

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

LIBEREC 2012

DAGMAR BOHÁČOVÁ

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA TEXTILNÍ



Studijní program: B 3107 Textilní chemie

Studijní obor: Chemická technologie textilní

**MEMBRÁNY Z POLYMERNÍCH VLÁKEN PRO
SPECIÁLNÍ VÝMĚNÍKY**

**MEMBRANES MADE OF POLYMERIC FIBRES
FOR SPECIAL HEAT EXCHANGERS**

Dagmar Boháčová

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jana Čandová

Rozsah práce:

Počet stran textu: 57

Počet obrázků: 29

Počet tabulek: 10

Počet grafů: 7

Počet stran příloh: 22

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 2.5.2012

Podpis:

Poděkování:

Ráda bych poděkovala vedoucí mé bakalářské práce Ing. Janě Čandové, za veškerou pomoc a čas, který mi věnovala a také za podnětné rady, kterými přispěla k vypracování této práce. Dále bych chtěla poděkovat doc. Ing. Jakubu Wienerovi, Ph.D. za cenné připomínky, odborné konzultace a poskytnutí podkladových materiálů.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá vývojem textilních materiálů z polymerních vláken pro adiabatické výměníky, které se uplatňují v pasivních domech při výměně znečištěného vzduchu za vzduch čistý. Cílem bylo otestovat membrány do takovýchto výměníků, od komerčně využívaných materiálů, přes klasické jako je například bavlna nebo polyamid, ale i nanovláknenné materiály až po nově vyvíjené typy membrán. Hlavním účelem tedy bylo vytvořit takovou membránu, která by se mohla relativně přiblížit vlastnostem komerčně využívaných materiálů a mohla být použita v konstrukci speciálních výměníků. Laboratorně bylo dosaženo pozitivních výsledků, přestože je nutné další testování, které by potvrdilo vhodné využití této nově vytvořené membrány.

Annotation

This bachelor thesis deals with the development of textile materials made of polymeric fibers for adiabatic heat exchangers, which are applied in passive houses to exchange polluted air for the pure air. The aim was to test the membranes in these heat exchangers ranging from commercially used materials, the classical materials such as cotton fabrics or polyamide fabrics to nanofiber materials to the newly developed types of membranes. The main purpose was to create a membrane that could be relatively close to properties of commercially used materials and could have been used in the construction of special exchangers. Laboratory tests resulted in positive results, however further testing is required to confirm the appropriate use of the newly formed membrane.

Klíčová slova:

Difúze, difúze vodních par, adsorpce, desorpce, porozita materiálů, transport vodních par skrz materiál, transport vlhkosti a vzduchu, propustnost vodních par, membrány z polymerních vláken, sorpční izotermy.

Keywords:

Diffusion, diffusion of water vapor adsorption, desorption, porosity materials, transport of water vapor through the material, transport of moisture and air permeability of water vapor, membranes of polymeric fibers, sorption isotherms.

Úvod

Membránové procesy jsou vyvíjeny v průběhu posledních pěti desetiletí jako moderní vysoce energeticky účinné separační metody založené na molekulárních vlastnostech oddělovaných látek. Základním cílem této snahy je dosažení co nejdokonalejšího oddělení produktu od příměsí při co nejnížší spotřebě energie. [1]

Rychle rostoucí uplatnění membránových procesů v různých průmyslových odvětvích vyžaduje syntetické membrány s různými členitými a funkčními vlastnostmi. V současné době je k dispozici celá řada polymerních materiálů pro separaci, které mají širokou nabídku vlastností. Nicméně některé z těchto materiálů mají svá omezení, ale jejich úpravou můžeme zlepšit selektivitu membrán.

Vzhledem k tomu, že membránové procesy zahrnují široké spektrum separačních problémů, je nutná znalost specifické membránové struktury a chování. Membrány se ale liší svou strukturou a následně tomu odpovídá i jejich chování. Proto je velmi důležité určení vlastností membrány a její struktury, kdy můžeme zcela kontrolovat výkonnost membrány.

Pochopení vztahů mezi strukturou polymerů a funkční vlastnosti membrán je základním předpokladem pro správný návrh materiálu a rychlou optimalizaci.

Tento základní předpoklad platí nejen pro transportní vlastnosti, ale i pro jiné fyzikální vlastnosti, které jsou ovlivněny chemickou strukturou polymerních materiálů.

V mnoha polymerních materiálech bylo zjištěno, že propustnost a selektivita spolu nepřímo souvisí, což znamená, že například vysokou selektivitu lze získat nízkou propustností. Nicméně je to stále cílem membránové vědy vyvinout takové materiály, které zvyšují propustnost a zároveň selektivitu.

Široké spektrum uplatnění membrán v mnoha průmyslových procesech znamená potřebu mít membrány s různými strukturami, vlastnostmi a funkčními skupinami. Úspěch membránového procesu, kriticky závisí na výběru správné membrány. [2]

Největší podíl používaných membrán byl a je dosud vyráběn z organických polymerních sloučenin. Jejich předností je variabilita způsobu přípravy umožňující vytvářet potřebné fyzikální struktury membrán, jak v pevné fázi, tak z roztoku. Prvními

materiály tohoto typu byly deriváty celulózy, které jsou ve většině aplikací dnes nahrazeny syntetickými polymery. [3]

Lze použít různé polymerní materiály jako selektivní membrány nebo materiálové bariéry pro přepravu vodní páry. V závislosti na aplikaci je preferována buď vysoká či nízká propustnost nebo selektivita vodních par. [4]

Takovéto membrány z polymerních materiálů se mimo jiné uplatňují v konstrukci výměníků, které jsou nejčastěji z kovů (hliník popř. i jiné kovy), přes které projde pouze teplo, ale neprojde žádná chemikálie nebo voda. Jinou možností jsou adiabatické (speciální) výměníky s plochou, kde dochází ke změně tepla a vlhkosti. Vlhkost dodáváme buď smícháním vzduchů nebo je vlhkost absorbovaná do výměníku a ten pak převede vlhkost pomocí tepla dál. Polymerové výměníky absorbují vlhkost na jedné straně a na straně druhé ji odpařují.

V současné době je vyvíjen speciální materiál, kde aktivním prostředím pomocí transportních PVA síťovadel mimo jiné byly testovány i další materiály (nanovlákná, zelenomodrý papír, a další ...)

Membránové vědy a technologie jsou v dnešní době považovány jako významný nástroj pro řešení některých důležitých globálních problémů, jakými jsou například problémy s nedostatkem pitné vody, odstraňování ekologických zátěží, apod. [5]

Mimo jiné se taky mohou uplatnit v pasivních domech při výměně vzduchu, kdy se uvnitř pasivního domu se musí vzduch vysoušet, protože ve srovnání se vzduchem venkovním má vyšší koncentraci vlhkosti. Uvnitř domu však také může docházet i k negativnímu efektu, kdy se vzduch ohřívá, je suchý, špatně se nám dýchá, a proto se musí v některých případech používat zvlhčovače vzduchu.

Obsah:

1	TEORETICKÁ ČÁST	11
1.1	Membrány	11
1.1.1	Membránové procesy obecně	11
1.1.2	Membránové technologie	12
1.2	Membránové materiály	13
1.3	Porozita membrány a transport vodní páry skrz membránu	14
1.4	Vlhkost a difúze	15
1.4.1	Difúzní operace.....	15
1.5	Transport látky a Fickovy zákony.....	16
1.6	Adsorpce a desorpce	18
1.6.1	Adsorpce na povrchu vlákna:	21
1.6.1.1	Rovnovážná sorpce.....	21
1.6.1.2	Mechanismy sorpce	22
1.6.1.3	Sorpce vody:.....	22
1.6.2	Transport vodní páry porézním prostředím	23
1.6.2.1	Měření propustnosti vodní páry.....	23
1.6.2.2	Difúze vodní páry v konstrukci	24
1.6.2.3	Rosný bod.....	24
1.6.2.4	Tepelné jevy při sorpci vody	25
1.7	Sorpční izotermy vlhkosti	26
1.8	Transport vlhkosti a vzduchotechnika v budovách a pasivních domech	27
1.9	Provedení filtrů v atmosférickém vzduchu	28
1.9.1	Filtry prachové a aerosolové	28
1.9.2	Sorpční filtry	30
1.10	Třídění a použití filtrů pro všeobecné větrání	31
1.10.1	Doporučení pro použití filtrů podle jednotlivých tříd.....	31
1.10.2	Použití filtrů při větrání nebytových budov dle ČSN EN 13779:2010	32
1.11	Požadavky na kvalitu vnitřního ovzduší	33
1.12	Čisté prostory	33
2	Experimentální část	34
2.1	Charakteristika materiálů:	34
2.1.1	Plošná hmotnost.....	36

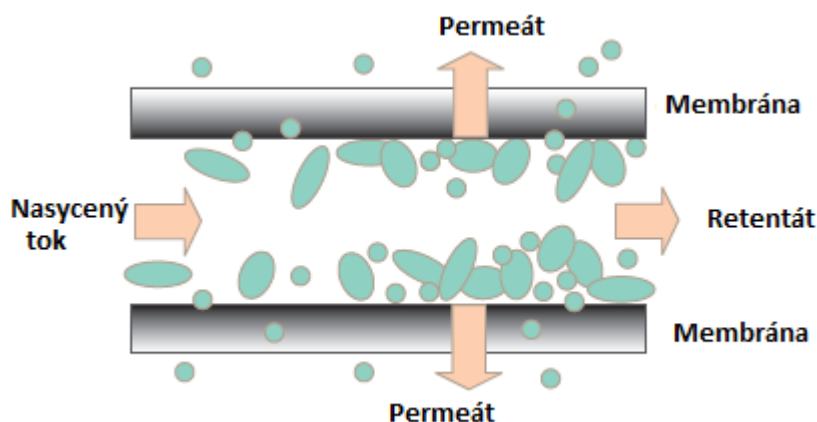
2.1.2	Prodyšnost.....	36
2.1.3	Tloušťka.....	37
2.1.4	Infračervená analýza	38
2.1.5	Sorpční izoterma	39
2.1.6	Testování průchodu vlhkosti- transport vody	40
2.1.7	Elektronová mikroskopie	41
2.2	Vývoj alternativního materiálu do výměníku.	42
2.2.1	Postup přípravy- zvlákňování polymeru:	42
3	Výsledky a diskuze:.....	43
3.1	Sorpční izotermy:	47
3.2	Testování průchodu vlhkosti	48
3.3	Elektronová mikroskopie	51
4	Závěr:.....	53
5	Seznam použité literatury:	55
6	Přílohy:	58

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Membrány

1.1.1 Membránové procesy obecně

Za srdce každého membránového postupu je považována membrána. Tu lze definovat jako selektivní bariéru mezi dvěma prostředím umožňující transport vybraných částic. Membrána je charakterizována účinností rozdělení transportovaných částic, tj. selektivitou, a dále pak množstvím převedené látky, tj. propustností (permeabilitou). Selektivita membrány je určena charakterem použitého materiálu a dokonalostí její výroby. Tento parametr je rozhodující z hlediska kvality vlastní separace složek směsi. Propustnost pak charakterizuje společně s velikostí hnací síly výkonnost celého procesu. Látka prošlá membránou je označována jako permeát, zadržená látka pak jako retentát. [1]



Obr.1.: Cross flow (rovnoběžné proudění nasyceného toku na povrchu membrány). [6]

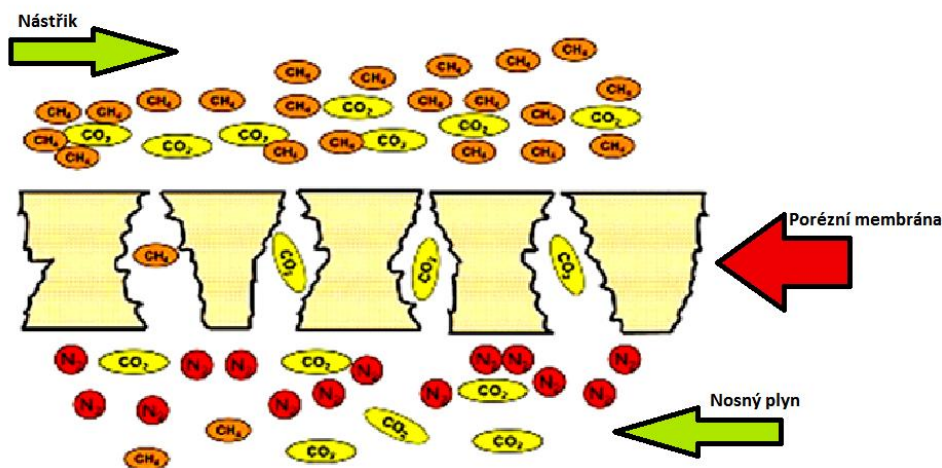
Permeát - část toku, který prostupuje, nebo prochází membránou při zpracování. Proud permeátu obsahuje látky, které jsou dostatečně malé, aby mohly projít póry uvnitř membrány.

Retentát - část toku, který nelze překročit, nebo je ponechán na membráně během zpracování. Proud retentátu obsahuje sloučeniny, které jsou příliš velké, aby propadly skrze póry v membráně. [6]

1.1.2 Membránové technologie

Polymerní membrány jsou například schopné separovat směsi plynů a par na základě síťového efektu- různé plyny difundují mezi polymerními řetězci různou rychlostí. Rozhodující pro výslednou separační účinnost je jak chemická struktura polymeru tak morfologie výsledné membrány. [7]

Separace plynů se uskutečňuje pomocí porézních anebo neporézních membrán. U porézních membrán je princip separace založen na tzv. síťovém efektu využívajícím různých velikostí pórů membrány a i různých velikostí jednotlivých molekul plynů, které je potřeba dělit (viz obrázek 2).



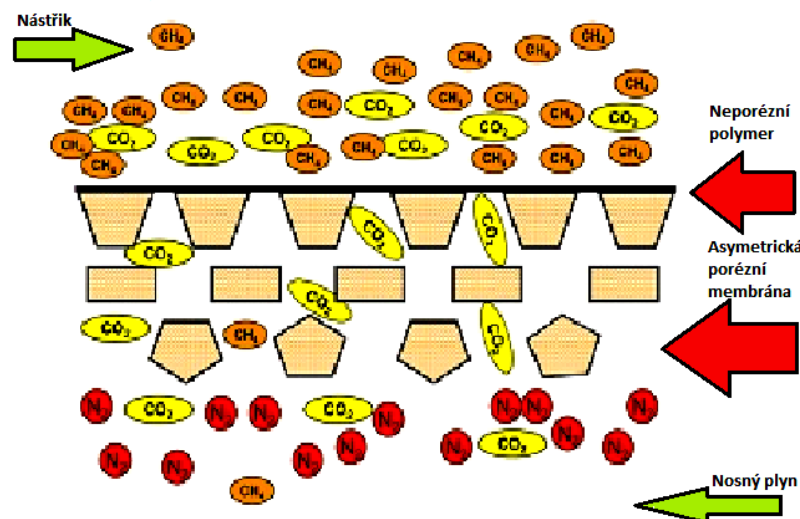
Obr. 2.: Příklad porézní membrány [8]

V případě neporézních membrán je princip separace založen na tzv. rozpustnostně-difuzním mechanismu, pro který platí, že:

$$P = D * S,$$

kde P je koeficient propustnosti, D je difuzní koeficient a S rozpustnostní koeficient.

Separace jednotlivých složek ve směsi je na základě tohoto mechanismu účinná pouze v případě, je-li alespoň v jednom koeficientu (rozpustnostním nebo difuzním) řádový rozdíl mezi jednotlivými složkami (viz obrázek 3).



Obr. 3.: Příklad neporézní membrány [8]

Celkový transport hmoty membránou je způsoben hnací silou (respektive jejím gradientem). U separace plynů je touto hnací silou tlakový rozdíl po obou stranách membrány ($< 8\text{MPa}$). Tlakový rozdíl může být vytvořen buď pomocí vakua na druhé (permeátové) straně membrány a nebo pomocí nosného plynu, kde na nástřikové straně membrány je použito přetlaku.

U rozpustnostně- difuzního mechanismu se předpokládá, že nejprve dochází k sorpci molekul na nástřikové straně membrány, poté molekuly difundují skrze membránu a nakonec se desorbují z permeátové strany membrány do nosného plynu či vakua. Řídícím krokem separace je buď difuze nebo sorpce složky, která je v dané membráně nejpomalejší a nebo se sorbuje nejméně. [8]

1.2 Membránové materiály

Membrány jsou nepostradatelnou součástí membránových procesů a jsou často označovány za rozhodující prvek při optimalizaci jejich kvality a výkonnosti. Membrána je v zásadě komplexní vysoce výkonná multifunkční bariéra, která odděluje dvě média a usnadňuje, resp. brzdí či zabraňuje transportu různých látek, a to vysoce selektivním způsobem. Membrány pracují v řadě aplikací – produkce pitné vody, přeměna energie, regenerace tkání, balící technika, separace nutné v potravinářství, ve výrobě chemického, automobilového a elektronického průmyslu, atd.

Membrány z vhodných termoplastických materiálů jsou využívány v tlakových membránových operacích mikrofiltraci a ultrafiltraci, náročnější na kvalitu materiálu jsou membrány pro reverzní osmózu. [3]

Dalším klíčovým prvkem membrány je, že musí zůstat bariérou pro tok solného roztoku.

Pokud kapalina může protékat přes membránu, bude funkčnost výměníku ztracena. Pouze materiály, které jsou překážkou pro kapaliny mohou uplatnit v konstrukci výměníku. Tyto materiály mají ale rozhodující tlak, při kterém kapalina je nucena projít přes membránu.

Některé polymerní membrány mohou vykazovat nižší vnitřní vlastnosti vodní páry při nízkých teplotách. [9]

Hlavními výhodami membránových technologií oproti tradičním řešením (jako např. destilace, absorpce,...) jsou:

- až 10krát nižší spotřeba energie,
- nízké investiční i provozní náklady,
- malé rozměry,
- minimální ekologické zatížení [7]

1.3 Porozita membrány a transport vodní páry skrz membránu

Transport páry přes neporézní hygroskopické polymerní membrány a filmy je často ovlivněn množstvím vody přítomné v polymeru. Z hlediska koncentrace závisící na koeficientu propustnosti se také průměrná relativní vlhkost vzduchu ukázala být užitečná v hromadné transportní reakci.

Většina našich zkoumaných materiálů je minimálně porézních. Avšak v těchto porézních materiálech se vodní pára transportuje v pórech, které jsou naplněny plynem, ve struktuře materiálu. Porézní textil obecně nevykazuje žádnou závislost difúzního odporu vodní páry na střední relativní vlhkost, protože vodní pára se jednoduše šíří přes pórovitost materiálu a neabsorbuje se dovnitř, ale šíří desorpcí z druhé strany polymerní vrstvy.

Obecně platí, že měřený difúzní odpor očekává pokles při vyšších teplotách. Nicméně se také ukazuje, že existuje několik případů, kdy není vidět žádná zřetelná změna vlastností. [9]

1.4 Vlhkost a difúze

Vlhkost je jednou z nejčastějších složek většiny tuhých nekovových materiálů a ovlivňuje jejich kvalitu nebo technologické vlastnosti. Typickým příkladem takových materiálů jsou plastické hmoty, přičemž problémy spojené s jejich navlháváním jsou technicky stále důležitější. [10]

Podstatou všech názorů na difúzi v termoplastických polymerech je, že difundující částice jednak vibruje, jednak se pohybuje postupně do stále nových rovnovážných poloh. Tento pohyb je umožněn lokálními fluktuacemi hustoty nebo „děr“, které se tvoří v důsledku pohyblivosti článků polymeru. (Difundující molekula se může pohybovat z určité polohy do sousední, vytváří-li pro ní pohyb článků makromolekul dostatečně velký prostor). Molekuly difúze (teoretickou interpretaci difúzního koeficientu).

Je patrné, že vše, co ovlivňuje pohyblivost polymerových článků bude mít podstatný vliv na difúzi. V tomto smyslu je jednou z nejdůležitějších vlastností polymerových systémů teplota skelného přechodu. Je to teplota, při níž systém přechází ze skelného nebo kvazikrystalického stavu na stav podobný kapalině. Ve skelném stavu je vibrační a oscilační pohyb segmentů minimální a možnost difúzního transportu částice malá. Nad touto teplotou mohou segmenty rotovat a oscilovat na větším rozsahu, což odpovídá tvorbě větších „děr“ a rychlejšímu difúznímu pronikání penetrantu.

Jinou důležitou vlastností ovlivňující pohyblivost segmentů je interakce řetězců buď vodíkovou vazbou nebo jednoduchou van der Waalsovou přitažlivostí. Vyšší tuhost řetězců vlivem vodíkové vazby se projeví nižší hodnotou difúzního koeficientu a větší hodnotou aktivační energie difúze, což je způsobeno dodatečnou energií, nutnou pro roztržení těchto vazeb a zabezpečení pohyblivosti polymerových článků.

Důležitou úlohu v transportních procesech hraje dále stupeň zesítnění. Jeho vliv se uplatňuje pouze při vysoké hustotě vazeb. [11]

1.4.1 Difúzní operace

Difúze je samovolné pronikání iontů z oblasti vyšší koncentrace do oblasti s nižší koncentrací vlivem tepelného pohybu částic.

Probíhají tak veškeré mezifázové pochody (např. vznik roztoků, adsorpce plynů). Podmínkou je existence gradientu koncentrace látky v obou fázích. Difúzní pochody

probíhají ve všech skupenstvích. Nejrychlejší je ve stavu plynném a nejpomalejší ve stavu tuhém. [12]

1.5 Transport látky a Fickovy zákony

Aby molekuly mohly reagovat, musí se potkat. Součástí dynamiky chemické reakce je transport. Látky samovolně difundují z míst o vyšší koncentraci do míst s nižší koncentrací. [13]

Příčinou toku látky jsou rozdíly v její koncentraci. Hnací silou je změna koncentrace složky s polohou, přesněji derivace koncentrace podle polohy. [14]

Makroskopický transport ustane, až se koncentrace vyrovnají, zmizí spád koncentrace. Difúzní tok J (množství látky, které projde za jednotku času jednotkovou plochou) je přímo úměrný zápornému spádu koncentrace c (zápornému proto, že látka difunduje opačným směrem, než stoupá koncentrace):

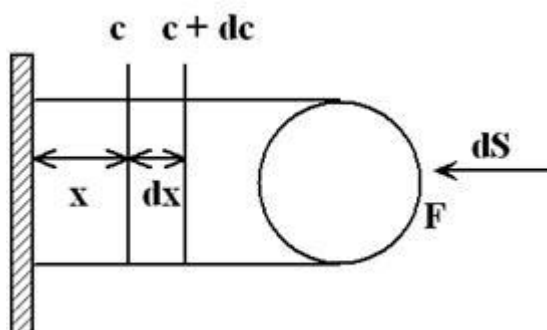
$$J_x = -D \frac{dc}{dx}$$

Konstantou úměrnosti v této rovnici je difúzní koeficient D který charakterizuje schopnost konkrétní látky difundovat v konkrétním prostředí. Této rovnici se říká první Fickův zákon (pro tok ve směru osy x ; spád, čili gradient, je roven derivaci podle prostorové souřadnice). [13]

Difúzní koeficient udává počet molů dané složky, která projde jednotkovou plochou za jednotku času při jednotkovém spádu koncentrace složky. Hlavní jednotka: m^2/s . [14]

Fickův zákon

$$dQ = -D \cdot S \cdot dc/dx \cdot dt$$



Obr.4.: Schéma procesu difúze [15]

Množství látky dQ (rozpuštědlo) difundující za jednotku času dt válcem s příčným průřezem S při gradientu koncentrace dc/dx , přičemž gradient dc/dx znamená, že

v příčném řezu se souřadnicí x se koncentrace rovná c a v příčném řezu $x + dx$ se rovná $c + dc$.

Znaménko mínus ve Fickově rovnici znamená, že difúze proběhla ve směru snížení koncentrace difundující látky, tj. ve směru záporného gradientu koncentrace.

S nárůstem teploty se zvyšuje rychlost chemické reakce i rychlost difúze.

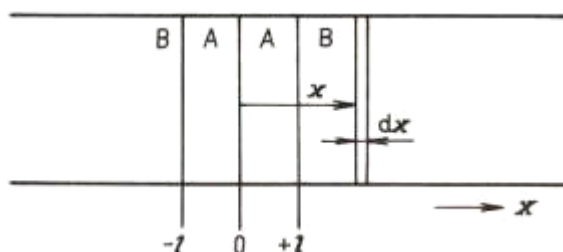
Rychlost difúze se zvětšuje přibližně o 2% při zvýšení teploty o 1%. To vyplývá z toho, že s růstem teploty obsahuje většina částic rozpouštědla dostatečné množství energie, a proto snadněji rozrušují nebo oslabují chemické vazby rozpustných látek. [15]

Během difúze se však snižuje gradient, což znamená, že koncentrace nezávisí jen na prostorové souřadnici, ale též na čase. Proto musíme přidat k prvnímu Fickovu zákonu ještě podmínku hmotné bilance (látky sice mění svoje rozložení v prostoru a v čase, její množství se však zachovává). Tak dostaneme druhou diferenciální rovnici, která je známa jako druhý Fickův zákon. Popisujeme-li difúzi v jednom prostorovém rozměru (lineární difúze), má druhý Fickův zákon tvar:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

Difúze je náhodný proces. Makroskopická příčina difúze je spád koncentrace. Mikroskopicky však molekuly o spádu neví. Pohybují se chaoticky do všech směrů, vykonávají náhodnou migraci.

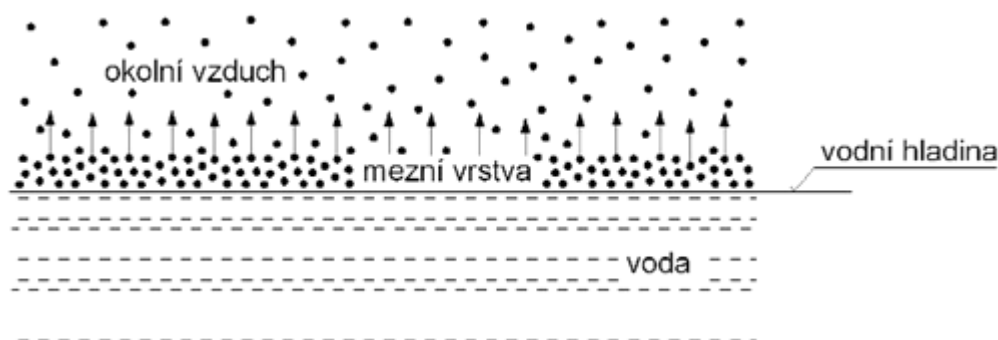
Na základě 1. Fickova zákona lze říci, že velikost toku je dána spádem koncentrace a na základě 2. Fickova zákona, že nejrychleji se koncentrace mění tam, kde je její největší „křivost“ koncentrace (druhá derivace). [13]



Obr. 5.: Schéma dvou oddělených plynů přepážkami. [16]

V nákresu jsou vyznačeny přepážky oddělující původně plyny A a B od sebe a dále vrstvička plynu mezi myšlenými rovinami v místech x a $x + dx$.

Odstraněním přepážek oddělujících oba plyny by se plyny spolu začaly okamžitě mísit. Je to děj, kdy neuspořádaný tepelný pohyb molekul a jejich vzájemné srážky totiž způsobí, že se molekuly obou plynů tak dlouho promíchávají, až se v celém objemu soustavy vytvoří plynná směs mající všude stejné složení. Pro zjednodušení by ke vzájemnému promíšení v uspořádání znázorněném na obrázku došlo vlivem difúze pouze ve směru hodnot x (jednorozměrný případ). [16]



Obr. 6: Znázornění principu odpařované vody. [17]

Fickův zákon platí pro oboustrannou difuzi, která však obvykle nenastává. Vodní pára může difundovat z vodní hladiny do vzduchu bez překážek, vzduch do vodní hladiny difundovat nemůže. Tj. molekuly vodní páry difundují z hladiny do vzduchu a současně i molekuly vzduchu difundují směrem k hladině. Molekuly vzduchu se však dostanou pouze na povrch nepřestupné hladiny, kde se shlukují a nasycují vodní párou a konvekčním pohybem se vracejí zpět. Pohybem vodní páry se zvyšuje tok jejich molekul, které difundují ve vzduchu. Hmotnostní tok vodní páry je tak při jednostranné difuzi větší než při oboustranné. Korekce toku odpařující se vlhkosti se označuje jako Stefanova korekce na jednostrannou difuzi. [17]

1.6 Adsorpce a desorpce

Pod pojmem adsorpce rozumíme pohlcování rozpustných plynů přes fázové rozhraní do kapaliny. Tato adsorpce může probíhat buď bez doprovodné chemické reakce, pak mluvíme o fyzikální absorpci, nebo s chemickou reakcí absorbovaného plynu s kapalinou, potom se jedná o chemisorpci. Opačný proces, tj. uvolňování plynů z kapaliny se nazývá desorpce.

Smět přestupu plynu přes fázové rozhraní, tj. absorpce nebo desorpce, závisí na složení plynu nebo kapaliny vůči rovnovážnému stavu při dané teplotě a tlaku. K absorpci dochází za podmínek, když je koncentrace absorbované složky v plynu větší než odpovídající rovnovážná koncentrace této složky v kapalině. V opačném případě dochází k desorpci, tj. koncentrace absorbované složky v plynu je nižší než odpovídající rovnovážná koncentrace v kapalině. Desorpci zachycených složek z kapaliny je také možno provést snížením tlaku. Tento postup je však velmi málo účinný a často se kombinuje s destilací, popř. s destilací a vodní párou. Desorpce se také provádí pomocí proudu inertního plynu (např. vzduch).

Při absorpci a desorpci je potřeba vytvořit v zázemí co největší plochu styku mezi kapalnou a plynnou fází, protože rychlost transportu hmoty přes fázové rozhraní je úměrná nejen koncentračnímu gradientu absorbované látky v obou fázích, ale také i velikosti mezifázové plochy.

Adsorpce je proces, při kterém dochází k zachycování některých složek z plynné nebo kapalně směsi na povrchu tuhých pórovitých látek (absorbentů) za současného uvolňování tepla. Desorpce je obrácený proces, tj. dochází k uvolňování zachycených složek z absorbentů. Průběh absorpce závisí na absorbované látce a použitém absorbentu, dále na velikosti povrchu absorbentu, na teplotě a koncentraci absorbované složky u kapalných směsí a parciálním tlaku složky u plyných směsí. Adsorpce se užívá zejména tehdy, je-li odstraňovaná látka přítomna v dané směsi pouze v malé koncentraci a je-li požadováno její úplné odstranění. Při její větší koncentraci se častěji používá absorpce.

Průmyslové absorbenty jsou tuhé látky s pórovitou strukturou a s vhodnou velikostí pórů. Používají se buď granulované (adsorpce z plynů) nebo práškové (adsorpce z kapalin). Musí být vysoce odolné vůči mechanickému namáhání, chemickým vlivům a teplotním změnám.

Technický význam mají následující absorbenty:

Aktivní uhlí- nejčastěji používaný absorbent. Vyrábí se bez přístupu vzduchu z upravených uhlíkatých látek (dřevo, piliny, kosti, rašelina). Používá se na odstranění organických látek z vody, při odbarvování roztoků, do filtrů masek

Silikagel- je obchodní název pro promytý a vysušený gel kyseliny křemičité, který se získává kyselou hydrolyzou rozpuštěných alkalických křemičitanů. Používá se na sušení plynů a kapalin, na odbarvování olejů, do filtrů masek.

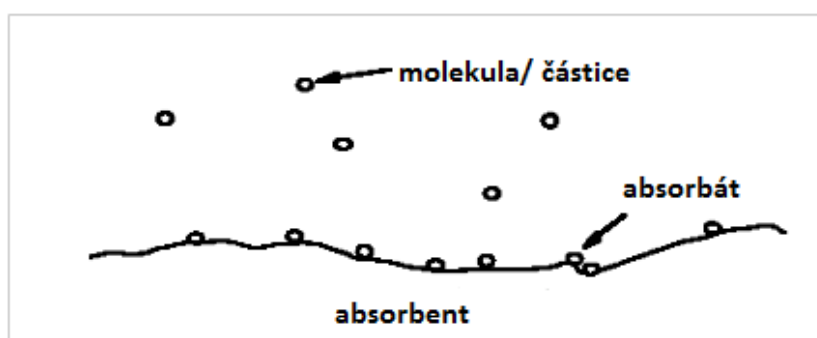
Alumina- granulovaná forma dehydratovaného oxidu hlinitého. Používá se k oddělení polárních složek ze směsi s nepolárními složkami.

Zeolity- jsou krystalické hlinito- křemičitany s pravidelnou strukturou pórů. Používají se např. na frakcionaci uhlovodíkových směsí a na sušení uhlovodíků. [12]

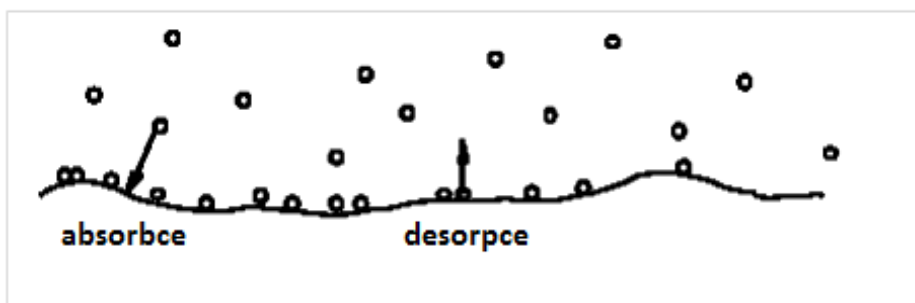
Sorpční vlastnosti vláken

Penetrant (absorbát absorptiva)

Absorbent –vlákno



Obr. 7.: Absorbce molekul na vlákno [18]



Obr. 8.: Dynamický proces [18]

Vlákno obklopeno prostředím, kde se vyskytují molekuly nebo částice jiných látek dochází k celé řadě procesů.

Podle znaménka elektrického náboje vlákna a částic jde o elektrostatické přitahování, resp. odpuzování.

V nepřítomnosti makroskopických elektrických nábojů mohou mít částice afinitu k vláknům (jde o rozdíl standardních chemických potenciálů vlákna a částice).

V případě náhodného Brownova pohybu částic bude frekventovaně docházet k interakcím povrchem vlákna a možným vazbám přes vodíkové můstky a Van der Waalsovy síly.

Makroskopicky se tyto procesy projeví usazováním na povrchu vláken (adsorpce) nebo pronikáním do vláken (difúze), případně transportem přes vlákna.

Vlákno obklopeno molekulami, resp. částicemi vodní páry, vody, kapalin, plynů a pevných částic: Difúze penetrantů prostředím (obvykle vodou nebo vzduchem k vláknu). Tento proces je obvykle dostatečně rychlý. [18]

1.6.1 Adsorpce na povrchu vlákna:

V řadě případů je adsorpce zkoumána samostatně, protože penetranty výrazně dále do vláken nepronikají resp. jejich pronikání závisí na množství penetrantu na povrchu.

Difúze hmotou vlákna, kdy dochází k transportu penetrantů do vláken.

V některých případech dochází k zadržování penetrantů na specifických místech ve vlákně a vytvoření vazby s vláknem.

Desorpce molekul penetrantu zpět do okolí (resp. přenos penetrantu).

Makroskopickým výsledkem může být usazování penetrantu na povrchu (např. částice prachu), pronikání penetrantu do vlákna (barvení, navlhání), resp. transport penetrantu přes vlákna (odstranění potu).

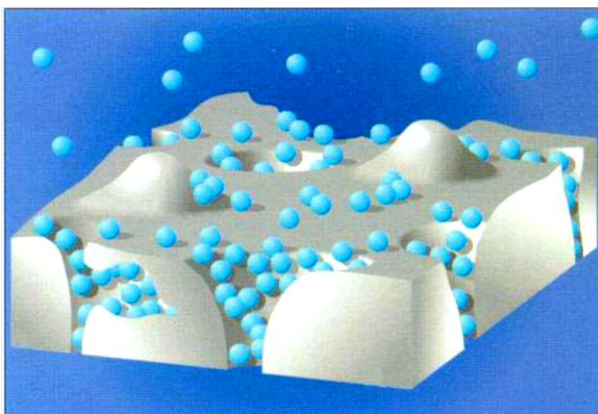
Procesy sorpce mají svoji kinetickou stránku (rychlost změn), rovnovážnou stránku (velikost změn) a termodynamickou stránku (hnací síla změn). Probíhají obvykle současně, takže jejich oddělené sledování vyžaduje často speciální experimenty. [18]

1.6.1.1 Rovnovážná sorpce

O mechanismu interakce molekul penetrantu s povrchem vláken lze získat informace z tzv. sorpčních isoterem.

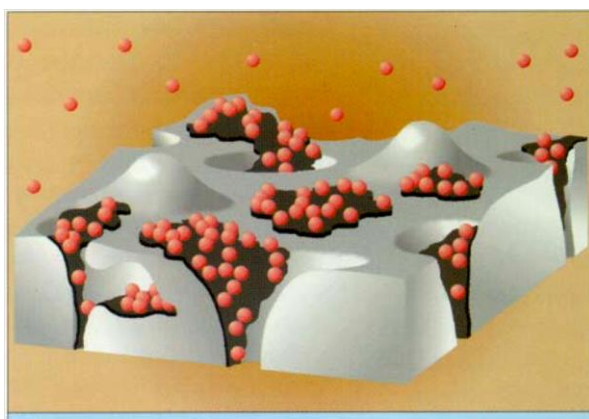
Principem je sledování závislosti mezi množstvím penetrantu na povrchu vlákna CP (resp. ve vlákně) a v okolí vlákna Co v rovnováze, kdy došlo k ustálení rozdělení penetrantu mezi vlákno a okolí. Předpokládá se, že v okolí nedochází vlivem sorpčních procesů ke změně koncentrace, tj. Co je konstantní.

1.6.1.2 Mechanismy sorpce



Obr. 9.: Fyzikální sorpce [18]

Příklad: sorpce inertního plynu při nízkých teplotách na povrch porézních materiálů.



Obr. 10.: Chemisorpce [18]

Příklad: reaktivní plyn sorbovaný na aktivních místech povrchu porézního materiálu.
[18]

1.6.1.3 Sorpce vody:

Hydrofilní vlákna– porézní (mají k vodě afinitu) jsou schopna vázat a transportovat vodu. Mezi hydrofilní patří všechna vlákna přírodní a chemická obsahující hydrofilní skupiny.

Hydrofobní vlákna– neporézní (není afinita k vodě) tj. nemožnost vázání vody specifickými vazbami a nesmáčení povrchu vláken. Voda se u svazků těchto vláken šíří kapilárními silami.

Voda působí v polymerech především jako plastifikátor snižující teplotu zesklenní a zvyšující tažnost. Voda ovlivňuje pozitivně také elektrickou vodivost a snižuje měrnou hmotnost.

Sorpce vody souvisí se složením vláken, stavem jejich povrchu, přístupností hydrofilních skupin, rozvolněností struktury, distribucí pórů, teplotou, časem a :

1. existencí sorpčních center (hydroxylové skupiny u celulóзовých vláken)
2. přístupností sorpčních center
3. vznikem sekundárních sorpčních center

Při sledování rovnovážné absorpce vodních par se konstruuji absorpční a desorpční izotermy. Sorpční izoterma pro vodní páru je závislost rovnovážné koncentrace vody ve vlákně na relativní vlhkosti vzduchu. [18]

1.6.2 Transport vodní páry porézním prostředím

Mnoho přírodních a syntetických textilních materiálů jsou do určité míry hygroscopické, jejich transportní vlastnosti, fyzikální struktura a přechodné chování je často velmi závislé na celkovém množství a rychlosti, při které se voda vstřebává do polymerní matrice.

Vzhledem k tepelné vodivosti vody a dalším nepříznivým vlastnostem a účinkům v porézních materiálech je s problémem tepelné izolace budov spojena také otázka odolnosti stavební konstrukce proti vlhkosti a kondenzaci vodních par uvnitř konstrukce. Ve vzduchu obsažené vodní páry difundují porézním materiálem z míst vyššího parciálního tlaku do míst s nižším parciálním tlakem. Hnací silou transportu vodní páry porézním prostředím je tedy gradient parciálního tlaku, jemuž je úměrná hustota hmotnostního toku vodní páry dle rovnice:

$$J = -\delta \text{grad} p$$

Konstantou úměrnosti je součinitel difúzní vodivosti δ , jež vyjadřuje schopnost látky propouštět vodní páru difúzí a jehož číselná hodnota je shodná s hustotou toku páry daným materiálem při jednotkovém gradientu 1 Pa m^{-1} parciálního tlaku páry. [19]

1.6.2.1 Měření propustnosti vodní páry

"Cup" je pravděpodobně nejpoužívanější technikou pro stanovení transportní rychlosti vodní páry přes polymerní materiál. Tato metoda se skládá z polymerního filmu pokrývajícího nádobu s vodou a vstřebávajícího vlhkost. Nádoba je umístěna v kontrolovaném prostředí vlhkosti a propustnosti vodních par skrze polymerní film, který je určen poměrem hmotnosti poklesu nádoby. Propustnost závisající na metodě „cup“ je

ovlivněna přítomností stojaté mezní vrstvy na obou stranách polymerního filmu. Navíc těsnění filmu může vést k chybám, a to zejména pro málo propustné filmy.

Přesnější výsledky lze získat metodou změny tlaku konstantního objemu, kde je vakuum použito na propustné straně membrány a vodní páry přítomné na absorbující straně membrány.

Z uvedené techniky může být stanovena pouze čistá propustnost vodních par, protože současně není možné měření propustnosti plynu a zároveň vodních par. [4]

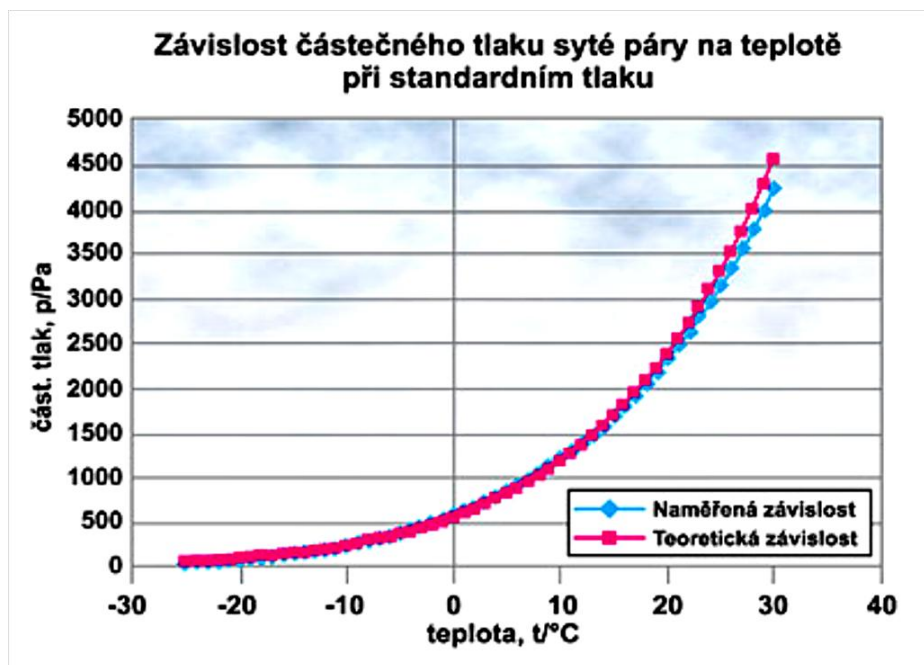
1.6.2.2 Difúze vodní páry v konstrukci

Pára se do konstrukce dostává dvěma způsoby. Buď společně s proudícím vzduchem netěsnými místy v konstrukci nebo tzv. difúzí.

Difúze je transport látky, který vyplývá ze statistického chování molekul látek, v našem případě molekul vodní páry, které jsou obsaženy ve vzduchu. Tyto molekuly konají ve vzduchu spontánní, chaotický pohyb do všech směrů. Z míst o vyšší koncentraci vodní páry se přirozeně šíří do okolí více molekul než z míst o nižší koncentraci. To směřuje k samovolnému vyrovnávání rozdílných koncentrací v různých místech. Po vyrovnání koncentrací pohyby molekul neustanou, pouze se kompenzují hmotnostní toky.

1.6.2.3 Rosný bod

Vodní pára má vlastnost, že při běžných teplotách přijatelných pro život může její částečný tlak ve vzduchu stoupat od nuly pouze do hodnoty částečného tlaku syté páry. Další přírůstky vodní páry při nezměněné teplotě jen kondenzují, ale obsah vodní páry ve vzduchu nezvyšují. Částečný tlak velmi silně, exponenciálně závisí na teplotě. (Viz obrázek 11).



Obr. 11.: Křivka rosného bodu

Hodnoty částečných tlaků syté vodní páry při různých teplotách při standardním tlaku 101 325 Pa. Modrá křivka ukazuje naměřené hodnoty, červená ukazuje teoretickou závislost vyjádřenou exponenciální funkcí. [20]

Z exponenciální závislosti tlaku syté páry na teplotě plynou některé vážné důsledky. I když je doma sucho a venku je vlhký vzduch, pára intenzivně difunduje zevnitř ven díky vysoké vnitřní teplotě. [20]

1.6.2.4 Tepelné jevy při sorpci vody

Pokud je voda absorbována do vláken z vodní páry, dochází nejprve ke kondenzaci na povrchu vláken.

Latentní teplo kondenzace (tj. teplo uvolněné při fázové změně z plynné na kapalnou fázi) se pohybuje kolem 2450 J/ 1 g vody. S ohledem na relativní vlhkost vzduchu RH je část kondenzované vody transportována do vlákna.

Část zůstává na povrchu a je transportována kapilárními silami. Vlivem přítomnosti molekul vody dochází zejména v přístupných oblastech vlákna (amorfní fáze) k tvorbě sekundárních vazeb, což se projeví větší uspořádaností systému a snížením jeho celkové energie.

Přebytečná energie se uvolní jako teplo sorpce. Sorpce je tedy exotermní proces doprovázený vývinem tepla. [18]

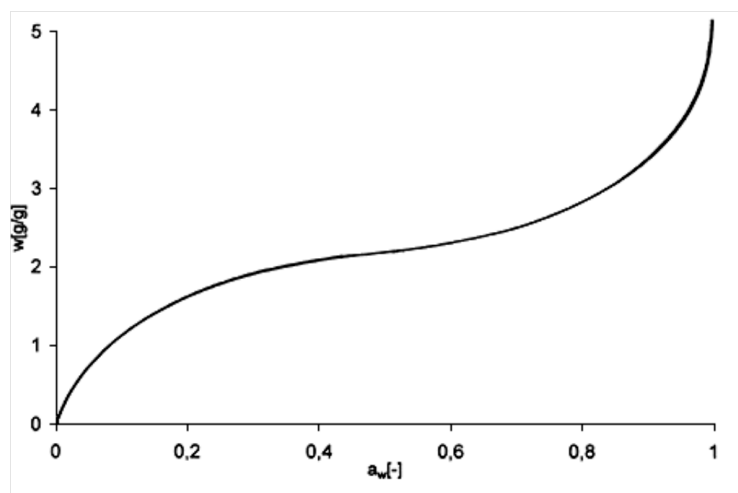
1.7 Sorpční izotermy vlhkosti

Izotermní sorpce vody je vztah mezi obsahem rovnovážné vlhkosti materiálu (vyjádřená jako hmotnost vody na jednotku hmotnosti sušiny) a vodní aktivity, při dané teplotě. Teplota má na sorpční izotermu významný vliv. Tento vztah je složitý a zároveň jedinečný pro každý výrobek v důsledku různého vzájemného působení (kapilárních a povrchových efektů) mezi vodou a pevnými složkami při různém obsahu vlhkosti. Existuje rozdíl (tzv. hystereze) v adsorpci (zvlhčování) a desorpci (sušení) izotermní křivky. Izotermy jsou velmi důležité pro složení a vývoj výrobků. Jejich porovnáním je možné určit, zda výrobek může být upraven tak, aby umožnil vyšší obsah vlhkosti při dané nebo nižší vodní aktivitě v určitém obsahu vlhkosti. Výsledkem může být vlhčí výrobek, který je ale stále stabilní. U sušených výrobků bude izoterma předvídat vlhkost výrobku při jeho sušení na stabilní úroveň vodní aktivity. [21]

Vlhkost sorpční izotermu lze měřit pomocí přidání vody do suchého vzorku (adsorpce) nebo odstraněním vody z mokrého vzorku (desorpce- sušení). Pro hysterezní jev bylo navrženo několik vysvětlení. Jedna z teorií je založena na dostupnosti aktivních polárních míst pro vazebné spojení molekul vody. Podle této teorie, v původním vlhkém stavu jsou polární místa v molekulární struktuře materiálu, která téměř úplně splňují požadavky adsorbované vody.

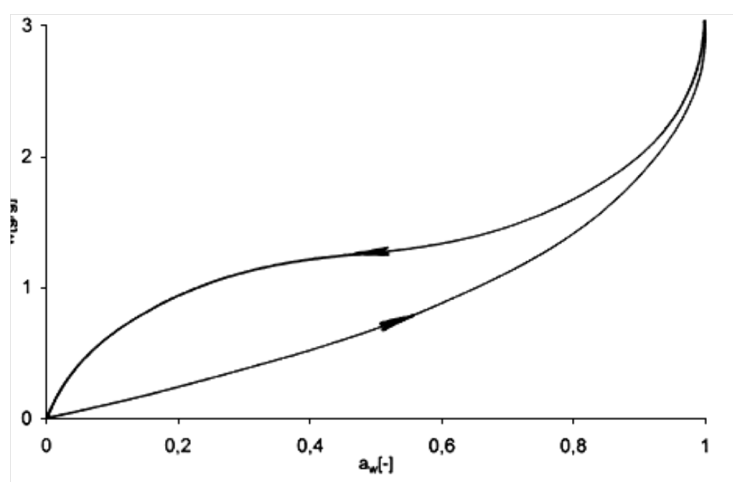
Sorpční izotermu představují důležitou předpověď trvanlivosti. Izoterma svědčí o dosažení bodu nasycení, který u krystalického materiálu narůstá velmi rychle. [22]

Sorpční izotermu jsou udávány obvykle ve formě diagramu, výjimečně tabelárně. Typická křivka rovnovážných obsahů vlhkostí biologického materiálu, potravin je znázorněná v souřadném systému $a_w - w$. Viz obr. 12. [23]



Obr. 12.: Hysterezní smyčka adsorpce izotermu [23]

Vytvořená hystereze je teoreticky termodynamická „nemožnost“, neboť a_w je stavová veličina, je funkcí tlaku a teploty, tudíž její určité hodnotě by měla odpovídat pouze jedna rovnovážná vlhkost. Důvody vzniklých rozdílů spočívají především ve struktuře kapilár a pórů, jež v důsledku nestejných průřezů jinak přijímají a jinak uvolňují vlhkost, respektive ji udržují uvnitř. Dalšími důvody vzniku hystereze u potravin může být přítomnost rozpustných cukrů a solí ve vlhkém materiálu, jež vytváří při sušení přesycené roztoky s odlišnou hodnotou a_w oproti nasyceným nebo nenasyčeným (viz obr. 13.) a také povrchová tenze, jež může způsobovat vyšší vlhkost při desorpci.



Obr. 13.: Hysterezní smyčka adsorpce – desorpce sorpční izotermy [23]

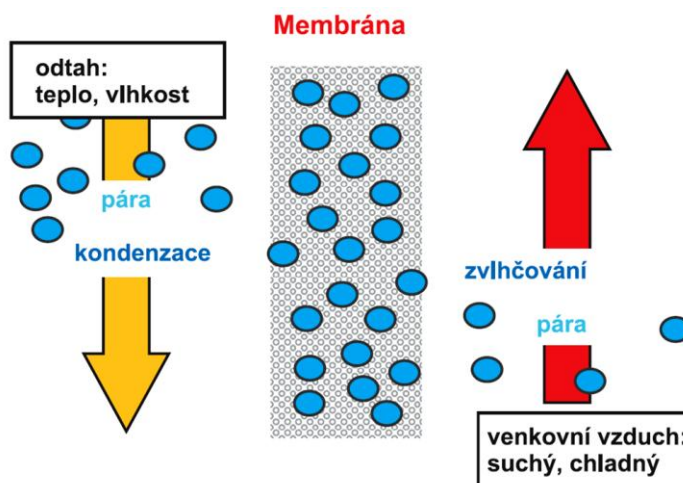
Rozdíl mezi absorpční a desorpční izotermou při zvolené relativní vlhkosti vzduchu RH se nazývá hystereze. Pro hydrofilní vlákna je hystereze výrazná a pro hydrofobní vlákna je nízká. Příčinou hystereze je různý počet přístupných vazných míst při sušení mokrého vlákna (více) nebo vlhčení suchého vlákna (méně). K hysterezi dochází také v případě, že ve vlákně jsou póry otevřené na obě strany nebo tzv. lahvovité póry (to může být příčinou hystereze hydrofobních vláken). Příčinou hystereze je také kapilární kondenzace. [23]

1.8 Transport vlhkosti a vzduchotechnika v budovách a pasivních domech

Mít pod kontrolou vzduchotěsnost a transport vlhkosti konstrukcí budovy je nezbytné nejen u nízkoenergetických staveb ale i u staveb, které tyto ambice nemají.

Zanedbání vzduchotěsnosti nutně povede při provozu budovy ve velmi krátké době k poškození vlhkostí v konstrukčních a izolačních materiálech a to jak snížením tepelného odporu tak později napadením houbami. I mrazové zvětrávání provlhlého minerálního

zdiva může mít svůj důvod v nekontrolovaném prostupu vlhkého vzduchu do zdiva netěsnostmi vzduchotěsnicí vrstvy. [24]



Obr.14.: Zpětný zisk vlhkosti: Princip zpětného zisku vlhkosti ve výměnících používajících membránu. [25]

Některé systémy zpětného zisku tepla umožňují i zpětný zisk vlhkosti. Využitím latentního tepla obsaženého ve vlhkosti, může být celková účinnost zpětného zisku tepla i o málo vyšší než u běžných výměníků využívajících jen přenos citelného tepla. Jsou k dispozici i rekuperační výměníky, které mají teplosměnnou plochu z membrány umožňující zpětný zisk až 60 % vlhkosti. Tyto systémy mají význam zejména v místech, kde dochází k nadměrnému vysoušení vzduchu, např. vlivem malé obsazenosti v zimním období. [25]

V neposlední řadě je těsnost budovy značným příspěvkem k bezpečnosti konstrukce před destruktivním působením kondenzující body v konstrukci pláště budovy. [26]

Příčinou pohybu vzduchu v atmosféře je rozdíl tlaků, který může být způsoben rozdílným počtem molekul v jednotce objemu nebo rozdílnou teplotou. [27]

1.9 Provedení filtrů v atmosférickém vzduchu

1.9.1 Filtry prachové a aerosolové

Filtry atmosférického vzduchu se podle charakteru odlučovaných částic rozdělují do dvou základních skupin:

- Filtry pro všeobecné (běžné) větrání (filtry prachové)
- Filtry vysoce účinné (filtry aerosolové)

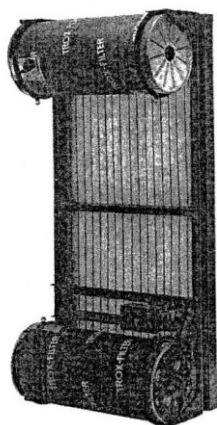
Obě základní skupiny se dále dělí na jednotlivé třídy. Filtry pro všeobecné větrání na třídy G (hrubé filtry G1 až G4) a F (jemné filtry F5 až F9), filtry vysoce účinné na filtry třídy E (EPA filtry E10 až E12), H (HEPA filtry H13 a H14) a U (ULPA filtry U15 až U17).

Se zvyšující se třídou filtrů se postupně zvyšují nároky na odlučovací schopnosti filtrů a mění se proto jak struktura vlastního filtračního materiálu a požadavky na jeho jímavost, tak filtrační rychlost. Uvedené změny se zákonitě zobrazují v rozdílném provedení těchto filtrů.

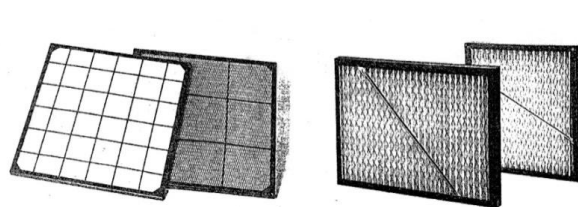
Podle provedení lze filtry pro všeobecné větrání v zásadě rozdělit na filtry vložkové a pásové, filtry vysoce účinné jsou vesměs vložkové.

Vláknité filtrační materiály, které tvoří převážnou část filtračních materiálů, se podle technologie výroby dělí na:

- **Rohože** ze silnějších syntetických nebo skleněných vláken, která jsou pro zlepšení vzájemné soudržnosti spojena impregnační látkou (pojivem) nebo v případě syntetických vláken tepelným zpracováním.
- **Rouna** z jemnějších minerálních (např. skleněných), syntetických nebo organických (např. celulóзовých) vláken, která jsou nanášena na nosný pojený podkladový materiál, který zároveň slouží na čisté straně jako ochrana proti průniku úlomků vláken do vzduchu.
- **Vpichované textilie**, kde zpravidla syntetická (polyesterová) vlákna jsou pro zlepšení soudržnosti ve vrstvě vzájemně propojena tzv. vpichovací technologií.
- **Filtrační papíry** z jemných skleněných nebo organických vláken, vyráběné papírenskou technologií. Filtrační papíry slouží pro výrobu skládaných filtrů.



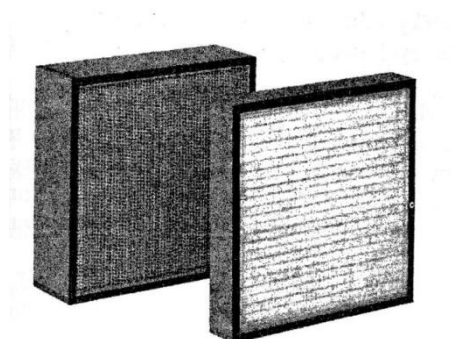
Obr. 15.: Pásový odvinovací filtr. [27]



Obr. 16.: Vložka deskového filtru s plochým filtračním materiálem a vložka deskového filtru se skládaným filtračním materiálem. [27]

Kromě vláknitých filtračních materiálů existují pro nižší třídy filtrů i porézní syntetické materiály a pro nejnižší třídy filtrů i materiály ve formě omyvatelných kovových nebo plastových náplní ve tvaru zrn, tělísek, třísek apod. do deskových vložkových filtrů.

Vložkové filtry se podle provedení v zásadě dělí na deskové (rámečkové), kapsové a skládané (kompaktní, kazetové, patronové).

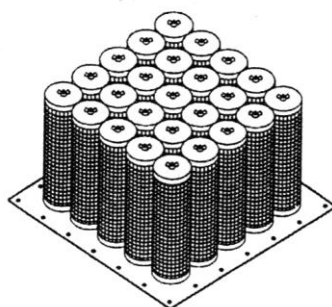


Obr. 17: Kompaktní filtrační vložka [27]

1.9.2 Sorpční filtry

Ve vzduchotechnických systémech pro větrání pracovního i obytného prostředí s oběhem vzduchu se často používají sorpční filtry na principu adsorpce. K zachytu plyných znečišťujících látek, ale i pachů, se používají adsorpční látky s velkým měrným povrchem, daným rozvinutou strukturou jemných trhlín a vnitřních pórů. Základní sorpční látka je aktivní uhlí, dále aktivní koks nebo saze, silikagel a jiné. Sorpční schopnost, tj. hmotnost zachycených plyných příměsí, závisí na kvalitě sorpční látky a dosahuje až 30% (vyjíměčně 50%) hmotnosti náplně při zachování vysoké účinnosti zachytu a téměř neměnné tlakové ztrátě vrstvy. Dalším použitím klesá účinnost zachytu a vložky do sorpčních filtrů se musí vyměnit.

Základní stavební jednotkou sorpčních filtrů bývají válcové patrony s vrstvou sorpční látky, které se montují na nosnou desku a počet paralelně řazených patron určuje velikost filtru.



Obr. 18.: Sorpční patronový filtr [27]

U sorpčních filtrů je nutno zajistit výrobcem stanovenou minimální dobu zdržení plynu při průchodu vrstvou. Tím je u vrstvy určité tloušťky dána maximální filtrační rychlost. Sorpční filtry při použití ve větrání a klimatizaci se mohou v zásadě montovat buď do klimatizačních jednotek jako druhý filtrační stupeň za filtr třídy F7 nebo u větších centrálních klimatizačních zařízení do stěny a to opět za filtry třídy F7. Sorpční náplň u patronových a deskových vložek, které jsou chráněny před zanášením prachem, je možno s použitím speciálních technologií regenerovat.

1.10 Třídění a použití filtrů pro všeobecné větrání

Dle současné mezinárodní normalizace v Evropě a ČSN se vzduchové filtry dělí na filtry atmosférického vzduchu pro odlučování částic u všeobecného větrání, které se zkouší a třídí dle převzaté evropské normy ČSN EN 779 a na filtry s vysokou účinností (vysoceúčinné filtry), které se zkouší a třídí dle převzaté normy ČSN EN 1822. Viz tab.1.

Třída filtru		Hraniční hodnoty třídy	
		A_m (%)	E_m (%)
hrubý	G1	$A_m < 65$	-
	G2	$65 \leq A_m < 80$	-
	G3	$80 \leq A_m < 90$	-
	G4	$90 \leq A_m$	-
jemný	F5	-	$40 \leq E_m < 60$
	F6	-	$60 \leq E_m < 80$
	F7	-	$80 \leq E_m < 90$
	F8	-	$90 \leq E_m < 95$
	F9	-	$95 \leq E_m$

Tab.1.: Tabulka třídy filtrů podle normy ČSN EN 779. [27]

1.10.1 Doporučení pro použití filtrů podle jednotlivých tříd

Filtry atmosférického vzduchu se používají ve větracích a klimatizačních zařízeních k odstranění nečistot, které se v atmosférickém vzduchu vyskytují. Třída filtrů se volí podle výskytu nečistot ve vzduchu a požadavku na čistotu prostoru, do kterého je vzduch přiváděn.

Pevné a kapalné příměsi jsou součástí venkovního vzduchu a jejich koncentrace a složení kolísá podle místních podmínek, ročního období i v průběhu dne. Největší

znečištění vzduchu je ve velkých městech a v okolí průmyslových podniků, nejmenší je na venkově. Příměsi jsou různého chemického složení a jsou způsobené lidskou činností (doprava, průmysl) i přírodního původu (eroze hornin, sopečná činnost, příměsi rostlinného a živočišného původu).

Běžně se za atmosférický prach považují částice o rozsahu velikostí 0,01 - 20 μm . Jemné částice jsou v atmosféře celoplanetárně rozšířeny.

1.10.2 Použití filtrů při větrání nebytových budov dle ČSN EN 13779:2010

Použití filtrů pro tyto účely závisí na kvalitě venkovního ovzduší a požadavcích na kvalitu vnitřního ovzduší.

Kvalita venkovního ovzduší je rozdělena do 3 tříd:

- ODA 1- čistý vzduch, který může být pouze dočasně znečištěn prachem, např. pyl,
- ODA 2- znečištěný vzduch (vzduch obsahující vysoké koncentrace prachu nebo plynných znečišťujících látek),
- ODA 3- velmi znečištěný vzduch (velmi vysoké koncentrace prachu nebo plynných znečišťujících látek).

Zatřídění oblasti do jednotlivé třídy se provádí podle hodnot faktorů znečišťujících látek f_{ZL}, udávající poměr koncentrace znečišťující látky v dané oblasti k limitní hodnotě (obdobu imisního limitu).

Z hlediska použití filtrů nás zajímají velikosti některých typických příměsí:

- viry	0,005 - 0,1 μm
- bakterie	0,2 - 20 μm (většinou 0,5 - 1,5 μm)
- výtrusy hub, mechu, lišejníků a kapradin	2 - 120 μm
- pyl	10 - 200 μm
- plísňe	2 - 100 μm
- cigaretový kouř	0,01 - 1 μm (střední hodnota 0,5 μm)
- olejová mlha	0,04 - 1 μm
- saze	0,01 - 0,5 μm
- kouř (spalování org. hmoty)	< 1 μm .

1.11 Požadavky na kvalitu vnitřního ovzduší

Jsou dány v pobytové zóně zařízením daného prostoru do kategorií IDA 1- IDA 4. Jednotlivé kategorie značí, že kvalita vnitřního prostředí je u:

- IDA 1 velmi vysoká,
- IDA 2 střední,
- IDA 3 průměrná (mírná, nevelká),
- IDA 4 nízká.

1.12 Čisté prostory

K dosažení požadovaných parametrů čistého prostoru je nutno u jeho návrhu a realizace brát v úvahu celou řadu faktorů, kterými jsou:

- Přiváděný vzduch- čistota, rychlost proudění, teplota, vlhkost,
- Druh proudění, které se dál dělí:
 - podle typu prostoru: vertikální nebo horizontální,
 - podle charakteru proudění v prostoru, vytvořeném přívodem a odvodem vzduchu: jednosměrné proudění a nejednosměrné, směšovací,
- Tlaková difference- mezi zónami a mezi ČP a okolím,
- Pracovní místo- instalované výrobní zařízení a jeho vliv na proudění (obtékání),
- Pracovníci (personál)- oblečení, pohyb,
- Přemísťování výrobku- způsob uchycení, postup přemísťování,
- Vlastní výrobní proces- přívod různých médií, účinnost výrobního zařízení, produkce tepla, vznikající látky. [27]

2 Experimentální část

2.1 Charakteristika materiálů:

Zkratka	Popis materiálu	Poznámka	Plošná hmotnost [g/m ²]	Tloušťka [mm]	Prodyšnost [mm/s]
A	Materiály na bázi papíru	komerční vzorky	79	0,1	0,1
B			65	0,12	0,15
C			134	0,28	0,19
ZM	Zelenomodrý vlnitý papír		106	1,62	14,2
CMC+PES	textilie z polyesteru napuštěná CMC		45	0,62	115
Ba	standardní bavlněná tkanina pro stálostní testy (definovaná dle ČSN)		112	0,34	567,5
PAD	standardní polyamidová tkanina pro stálostní testy (definovaná dle ČSN)		81	0,16	218,6
Manila	Manila papír		19	0,05	16,3
FP	Filtrační papír		87	0,23	11,5
Sklo	Skleněná vlákna-netkaná struktura ze skleněných vláken vyrobená papírenskou technologií		17	0,13	74,5
Nano	Vrstva polyamidových nanovláken o plošné hmotnosti 12g/m ²	Elmarco	18	0,14	1,6

Zkratka	Popis materiálu	Poznámka	Plošná hmotnost [g/m2]	Tloušťka [mm]	Prodyšnost [mm/s]
1A	Pegatex SMS (polypropylenová vlákna zpracovaná nanotechnologií) - gramáž 8 g / m 2 - vynikající mechanické vlastnosti - kontrolovaná prodyšnost	nově vytvořené membrány	30	0,21	4,65
1B			85	0,34	0,57
2A	Pegatex SMS (polypropylenová vlákna zpracovaná nanotechnologií) - gramáž 10 g / m 2 - vynikající mechanické vlastnosti - kontrolovaná prodyšnost		95	0,24	1,29
2B			46	0,86	0,36
3A	Pegatex SMS (polypropylenová vlákna zpracovaná nanotechnologií) - gramáž 13 g / m 2 - vynikající mechanické vlastnosti - kontrolovaná prodyšnost		50	0,35	0,4
3B			85	0,55	1,31

Tab. 2.: Charakteristika vlastností všech zkoumaných materiálů.

Pozn.: popis použitých metod viz kapitoly 2.1.1.- 2.1.7.

U těchto materiálů byly zjištěny tyto vlastnosti a parametry:

- tloušťka
- prodyšnost
- plošná hmotnost
- testování průchodu vlhkosti
- sorpční izoterma vlhkosti
- rozbor infračervenou analýzou

Dále také byly pořízeny snímky z elektronové mikroskopie u komerčních a nově vytvořených membránových materiálů.

2.1.1 Plošná hmotnost

Podstata výpočtu:

Malé vzorky materiálu (5x5cm) byly přesně zváženy na digitálních vahách s přesností na tři desetinná místa. Následně byla vypočtena plošná hmotnost v g/m^2 . Viz tab. 2.

2.1.2 Prodyšnost



Obr. 19.: Přístroj na měření prodyšnosti. [28]

Podstata zkoušky:

V laboratorních podmínkách se prodyšnost plošných textilií standardně hodnotí podle ČSN 80 0817, která odpovídá EN ISO 9237. Princip měřících přístrojů pro zjišťování prodyšnosti spočívá ve vytvoření tlakového spádu mezi dvěma stranami plošné textilie. Tím dojde k proudění vzduchu přes textilií a zaznamenává se rychlost proudu vzduchu za daného tlakového spádu. [28]

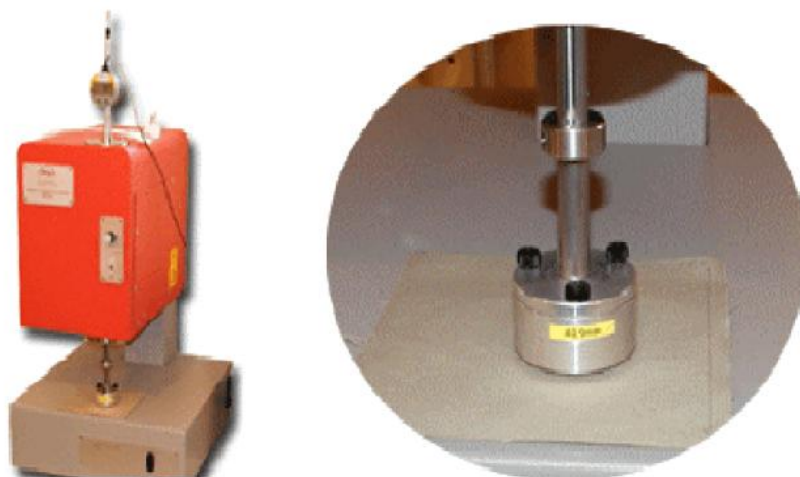
Po zapnutí přístroje a zkontrolování všech nastavených parametrů přístroje byl vložen materiál na označenou plochu a byl přitlačen ramenem přístroje, díky kterému mohla být prodyšnost změřena. Prostup vzduchu se reguloval pomocí otočného kolečka v závislosti na prodyšnosti materiálu.

Minimální velikost vzorku pro co nejpřesnější měření byla 12x12cm.

Měření prodyšnosti probíhalo na přístroji na měření prodyšnosti na KHT.

2.1.3 Tloušťka

Popis měření na tloušťkoměru:



Obr. 20.: Tloušťkoměr. [29]

Přístroj SDL M034A je určen pro měření tloušťky textilií, které je stanoveno jako měření kolmé vzdálenosti mezi základní deskou, na které je vzorek umístěn a paralelním kruhovým přitlačným kotoučem, který vyvíjí specifikovaný přitlak na zkoušenou plochu textilie. Přístroj je vybaven přitlačnou hlavicí 20 a 100 cm² a je možno aplikovat sílu 0,1- 200 N.

Průběh měření a zpracování výsledků je řízen pomocí počítačového softwaru, přístroj je vybaven tiskárnou. Měření probíhalo s přitlačnou hlavicí 20 cm² a podle normy

ČSN 800 844. Síla přitlaku byla zvolena 1000 Pa. Z toho vyplývá, že zatížení vzorku bylo 200 g.

Princip měření:

Nová zkouška je nejprve zahájena volbou jednotek na PC jednak pro zatížení (gramy) a jednak pro tloušťku (milimetry). Stejně jednotky bylo třeba nastavit i na měřidlo přístroje. Dále následuje volba cesty pro ukládání naměřených dat, volba přitlačné plochy a volba velikosti přitlaku.

Po nadzvednutí přitlačné patky přístroje vznikne prostor pro vložení vzorku. Protože vzorek má svoji vlastní hmotnost, je nutné tuto hodnotu od měření eliminovat, vynulováním hodnoty zátěže.

Na vzorek textile působí přitlačná patka velmi pomalou rychlostí do požadovaného přitlaku. Na obrazovce se zobrazí výsledky. Ty lze akceptovat nebo odmítnout a případně je i možno zkoušku opakovat. Po skončení zkoušek se zobrazí statistická analýza. [29]

Ve výsledcích je uvedený průměr z 5ti měření každého vzorku materiálu.

Viz tab.2.

2.1.4 Infračervená analýza

Dalším z provedených testů byla infračervená analýza, kdy byly testovány pouze komerční vzorky, tedy vzorky materiálů označených jako A (1), B (2), C (3), CMC+PAD (4) a ZM (5).

Podstata a princip analýzy:

Infračervená spektroskopie je analytická technika určená především pro identifikaci a strukturní charakterizaci organických sloučenin a také pro stanovení anorganických látek. Tato technika měří pohlcení infračerveného záření o různé vlnové délce analyzovaným materiálem.

Principem metody je absorpce infračerveného záření při průchodu vzorkem, při níž dochází ke změnám rotačně vibračních energetických stavů molekuly v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. Analytickým výstupem je infračervené spektrum, které je grafickým zobrazením funkční závislosti energie, většinou vyjádřené v procentech transmitance (T) nebo jednotkách absorbance (A) na vlnové délce dopadajícího záření. [30]

Ze vzorků 1 a 2 byl připraven výluh v dichlormethanu. Výluh byl měřen reflexní technikou (ATR) po odpaření rozpouštědla.

2.1.5 Sorpční izoterma

Popis stanovení izoterem:

Malé vzorky předem zvážené do konstantní hmotnosti se viditelně označily. Takto označené vzorky- od každého materiálu několik kousků o velikosti 2x 5cm, se vložily po jednom od každého druhu materiálu do 10 uzavíratelných patron s různým obsahem definovaných solí a s malým, předem daným množstvím destilované vody. V patroně č. 1 byla pro srovnání destilovaná voda. Po uzavření patron se vzorky se nechaly v patronách jeden den, poté došlo opět k zvážení vzorků a zápisu jednotlivých dat. Pokus trval 10 dní, poté byl ze získaných výsledných dat zpracovaný graf.

Podstatou této zkoušky bylo otestovat materiály z hlediska absorpce vlhkosti v závislosti na použité soli a vlhkosti vzduchu v daných patronách. Viz tab. 3.

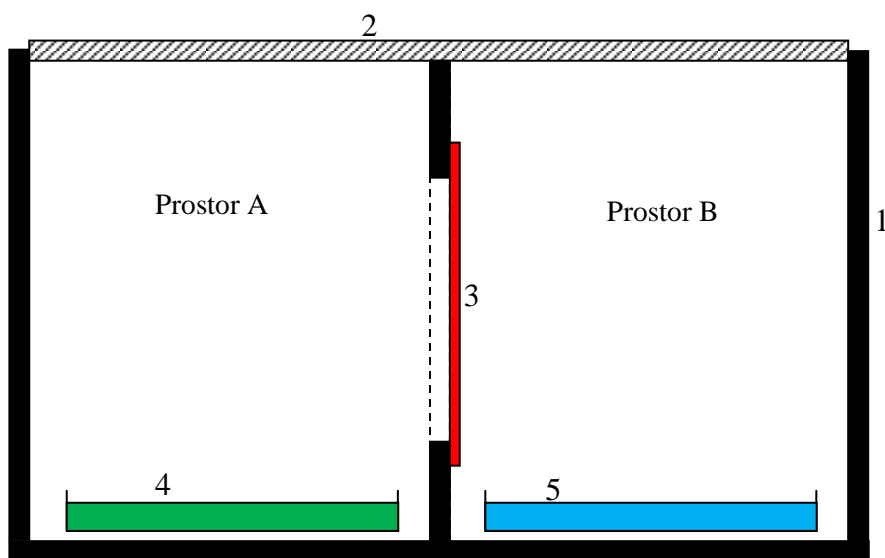
Stanovení sorpčních izoterem solí:		
patrona č. 1	3ml	voda
patrona č. 2	10g+ 3ml	dušičnan amonný
patrona č. 3	5g+ 3ml	síran draselný
patrona č. 4	5g+ 3ml	dusičnan draselný
patrona č. 5	5g+ 3ml	síran amonný
patrona č. 6	5g+ 3ml	chlorid draselný
patrona č. 7	10g+ 3ml	chlorid hořečnatý
patrona č. 8	5g+ 3ml	uhličitan draselný
patrona č. 9	10g+ 3ml	dusičnan hořečnatý
patrona č. 10	5g+ 3ml	chlorid litný

Tab.3.: Použité soli a jejich jednotlivé dávkování do patron.

2.1.6 Testování průchodu vlhkosti- transport vody

Popis testování:

Pro testování propustnosti vody skrz membránu bylo třeba vytvořit definované podmínky na jejích oddělených stranách – realizovaných „prostorem A“ a „prostorem B“. V tomto nově navrženém zkonstruovaném zařízení je vlhkost na oddělených stranách testované membrány udržována pomocí destilované vody na jedné straně a roztoku soli na straně druhé (v tomto testování silikagel). Viz obr. 21.



Obr. 21.: Schéma pro transport vlhkosti v laboratorních podmínkách.

- 1- skleněná nádoba nepropustná pro vlhkost
- 2- odnímatelné nepropustné víko nádoby
- 3- testovaný vzorek, upevněný magnety
- 4- systém roztok/sůl udržující definovanou vlhkost v prostoru A
 - Petriho miska o definované hmotnosti
- 5- systém roztok/sůl udržující definovanou vlhkost v prostoru B
 - Petriho miska o definované hmotnosti



Obr. 22.: Transport vlhkosti v laboratorních podmínkách

V původním plánu bylo použít roztoky solí s definovanou vlhkostí viz tab. 4., ale nakonec se při testování realizovaly pouze extrémní případy, proto byl zvolen silikagel a voda.

Sůl	Teplota (°C)				
	5	10	15	20	25
chlorid litný	11,3	11,3	11,3	11,3	11,3
chlorid hořečnatý	33,6	33,5	33,3	33,1	32,8
uhličitan draselný	43,1	43,1	43,1	43,2	43,2
bromid sodný	63,5	62,2	60,7	59,1	57,6
chlorid sodný	75,7	75,7	75,6	75,7	75,3
chlorid draselný	87,7	86,8	85,9	85,1	84,3
síran draselný	98,5	98,2	97,9	97,6	97,3

Tab. 4.: Původní plán s roztoky solí [31]

Tímto způsobem bylo dosaženo definovaných podmínek v okolí membrány. Volbou vhodných solí lze dosáhnout konkrétních požadovaných relativních vlhkostí.

Materiál o rozměrech 7x7 cm byl umístěn pomocí magnetů mezi prostor A a B. Do Petriho misek v prostoru A bylo dáno definované množství destilované vody (15g) a do prostoru B definované množství silikagelu (10g). Poté se prostor uzavřel víkem.

V prvních pokusech bez čidel měřících teplotu a vlhkost bylo víko otevíráno v jednotlivých jednohodinových intervalech. Po otevření se zvážily obě Petriho misky, které byly následně vráceny zpátky do prostorů A a B a byla odečtena hmotnost misek. Tento pokus trval přibližně 4 hodiny. Poté byla výsledná data zpracována do grafu. Viz grafy:

V dalších pokusech, které již probíhaly s čidly na měření vlhkosti a teploty se akvária v delších intervalech a to až po čtyřech hodinách. Měřila se pouze měnící se vlhkost v prostorech A a B. Ze získaných dat byl vytvořen graf. Viz grafy:

2.1.7 Elektronová mikroskopie

Této metodě byly podrobeny pouze komerční materiály (A, B,C, ZM), skleněná vlákna, CMC+ PAD, nanovlákna a nově vytvořené membrány (1A, 1B, 2A, 2B, 3A, 3B).

Popis zhotovení snímků:

Malé předem připravené vzorky testovaných materiálů (1x1cm) byly pokoveny (zlatem) v důsledku povrchové vodivosti elektronů. Dále pak byly vzorky vloženy do mikroskopu, a byly pořízeny obrázky- viz. výsledky kap. 3.

2.2 Vývoj alternativního materiálu do výměníku.

2.2.1 Postup přípravy- zvlákňování polymeru:

K přípravě byly použita polypropylenová textilie (vytvořena nanotechnologií), síťovadlo (PVA 16%), síťovací činidla (glyoxal, kyselina fosforečná).

Byl připraven 1 roztok o objemu 100ml, který obsahoval:

16% PVA..... 16g
3% Glyoxalu..... 0,5g
4% H₃PO₄.....0,65g

Takto připravený roztok se následně důkladně promíchal a pak nanese na předem zvážený textilní materiál- první vzorky byly o velikosti 5x5cm). Po nanesení byl materiál odmačknut na fuláru, zvážen a dán na speciální silikonovou formu.

Pro určení mokrého přivažku byly vzorky i po nanesení zváženy. Poté byla provedena fixace materiálu nejprve 5 min při 135°C, ale doba zasušení pro síťovadlo byla krátká. Nedošlo tak k dostatečnému zesíťování- materiál byl mazlavý a částečně i rozpustný ve vodě. Proto byl u dalších vzorků upraven postup fixace. Následující vzorky byly zasušeny v sušárně při 80°C po dobu 5 minut, poté se vzorek fixoval při 135°C po dobu 10 minut.

Roztok síťovadel byl nanesen na 3 typy materiálu lišících se pouze plošnou hmotností. Tyto vzorky byly označeny 1, 2, 3.

Vzorek 1: 8g/m²
Vzorek 2: 10g/m²
Vzorek 3: 13g/m²

Následně v rámci pokusu jim bylo přidáno další označení, které upřesňovalo počet nánosů síťovadel a následný odmačk na fuláru.

Vzorek 1A: 1x nános roztoku síťovacích prostředků, 1x odmačk na fuláru, 1x fixace.

Vzorek 1B: 2x nános roztoku síťovacích prostředků, 2x odmačk na fuláru, 2x fixace.

Vzorek 2A: 2x nános roztoku síťovacích prostředků, 2x odmačk na fuláru, 2x fixace.

Vzorek 2B: 1x nános roztoku síťovacích prostředků, 1x odmačk na fuláru, 1x fixace.

Vzorek 3A: 1x nános roztoku síťovacích prostředků, 1x odmačk na fuláru, 1x fixace.

Vzorek 3B: 2x nános roztoku síťovacích prostředků, 2x odmačk na fuláru, 2x fixace.

Výpočet mokrého přivažku:

Z následujícího vzorce byl vypočten mokrý přivažek jednotlivých materiálů:

$$X = \frac{[B]}{[A] + [B]} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Vzorek za sucha (A)

Vzorek za mokra (B)

Výsledky mokrého přivažku jednotlivých materiálů viz kapitola

U těchto nově vytvořených materiálů byly zjištěny tyto vlastnosti a parametry:

- plošná hmotnost
- prodyšnost
- tloušťka

Dále byly pořízeny snímky z elektronové mikroskopie.

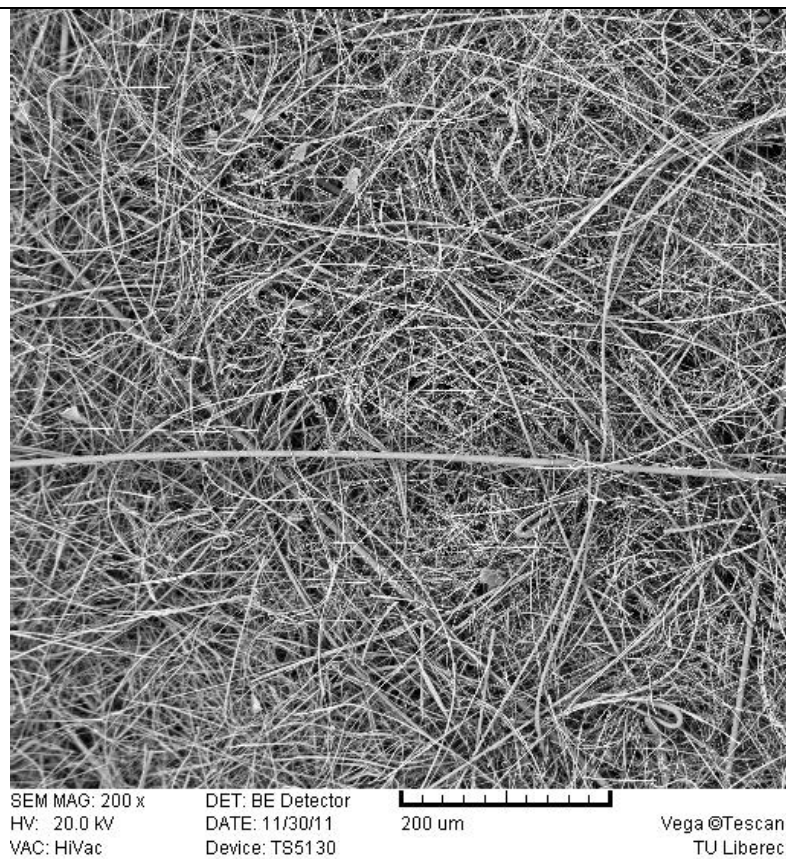
Výsledky plošné hmotnosti, prodyšnosti a tloušťky jednotlivých materiálů viz tab. 2.

3 Výsledky a diskuze:

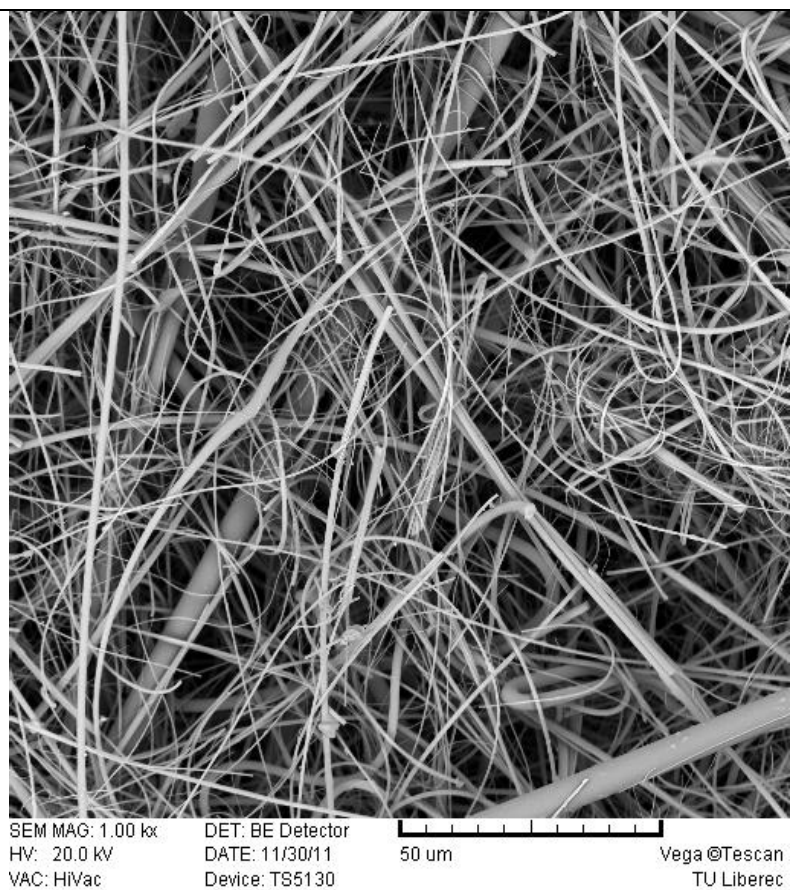
Ze zjištěných vlastností a parametrů materiálů vyplývá že komerční materiály (A, B, C, ZM), které jsou na bázi papíru mají kompaktnější strukturu než materiály na bázi vláken, takže jsou méně porézní.

Rozdíl struktur materiálů na bázi vláken a na bázi papíru ukazují snímky z elektronové mikroskopie, viz obr. 23, 24, 25, 26.

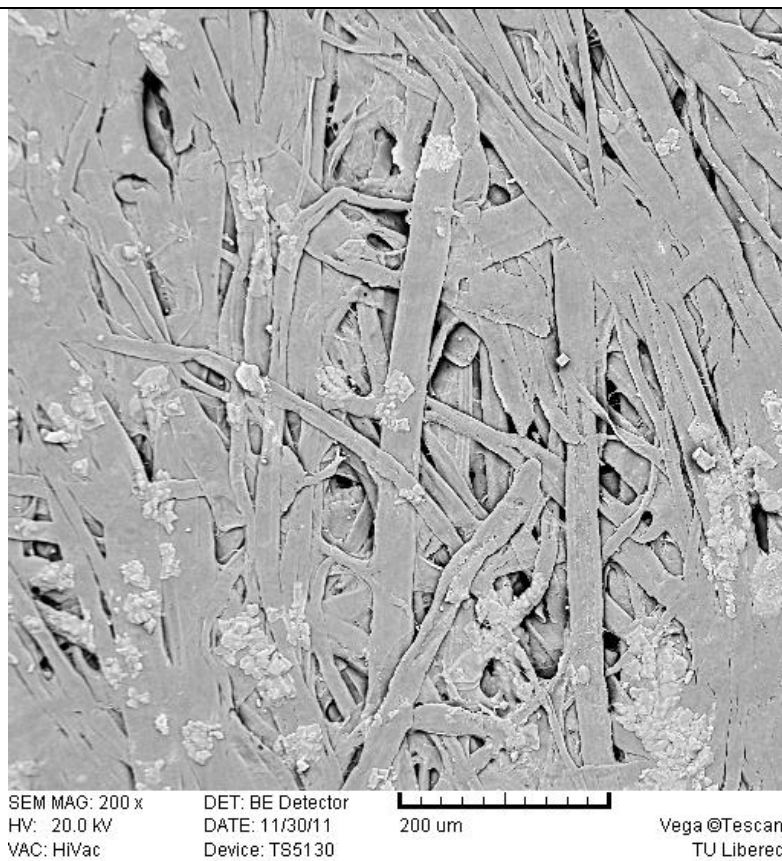
Obr. 23.:
Skleněná vlákna



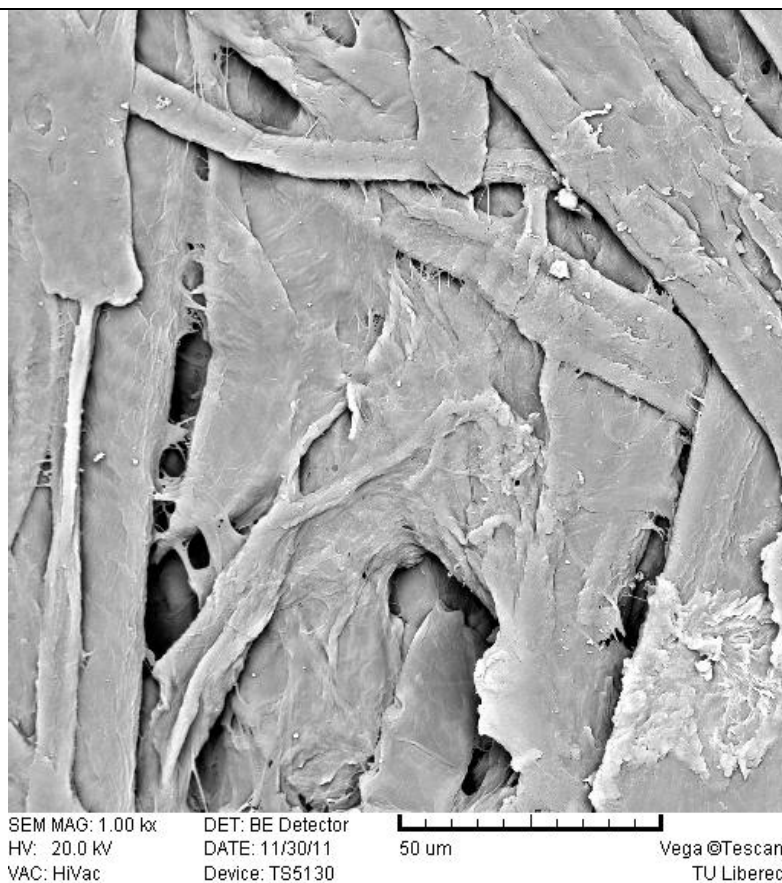
Obr. 24.:
Skleněná vlákna-
detail



Obr. 25.:
Vzorek A



Obr. 26.:
Vzorek A- detail



Poznámka: Zde jsou uvedeny pouze dva materiály (plošně i v detailu) a to pro srovnání materiálu, který je na bázi vláken a materiálu na bázi papíru. Další obrázky jsou uvedeny v příloze (obr.: 1, 2, 3, 4, 5, 6).

V rozboru z infračervené analýzy: Podle charakteru spektra (viz obr. 27) bylo usouzeno následující

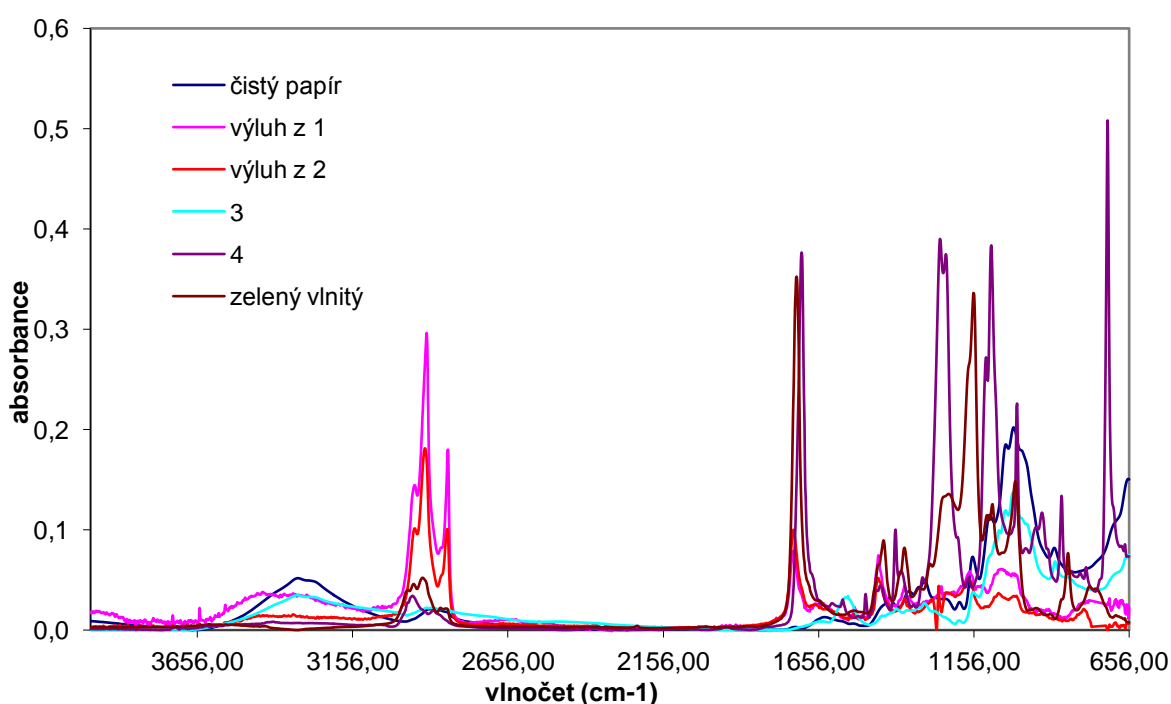
Vzorek 1: Jedná se o parafin s velmi malou příměsí esteru, jedná se proto o povoskovaný papír.

Vzorek 2: Jedná se o ethylenglycol stearát.

Vzorek 3: Jedná se o čistý papír, pouze s malou příměsí anorganických plniv.

Vzorek 4: Vzorek není papír, ale polyester (polyethylen tereftalát).

Vzorek 5- zelený vlnitý : Jedná se o papír, na vršcích zvlnění je vrstva akrylátu.



Obr. 27.: Spektrum infračervené analýzy

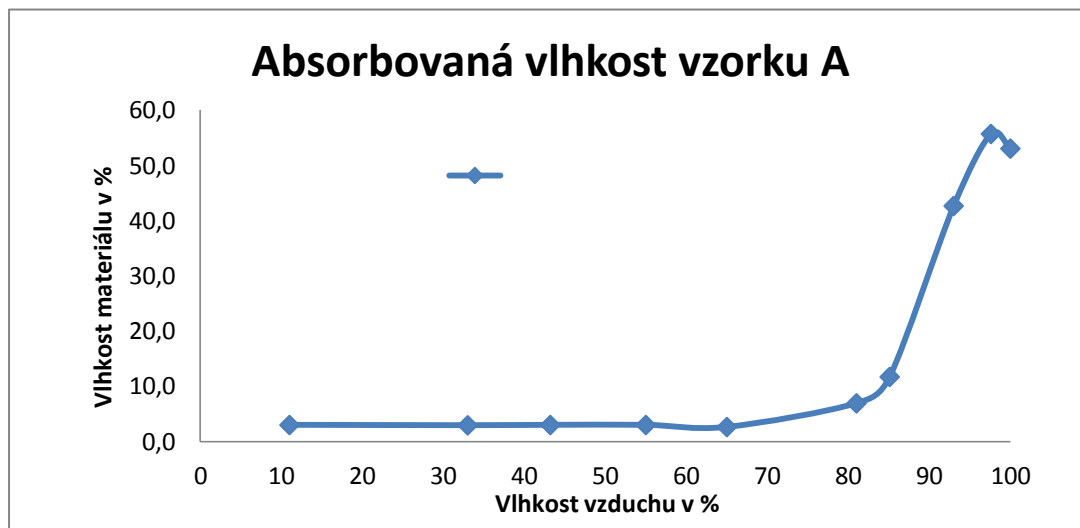
3.1 Sorpční izotermy:

Vzorek A

Tab. 5.: Tabulka absorbované vlhkosti vzorku A

patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	53,1	55,7	42,7	11,7	6,9	2,6	3	3	2,9	3

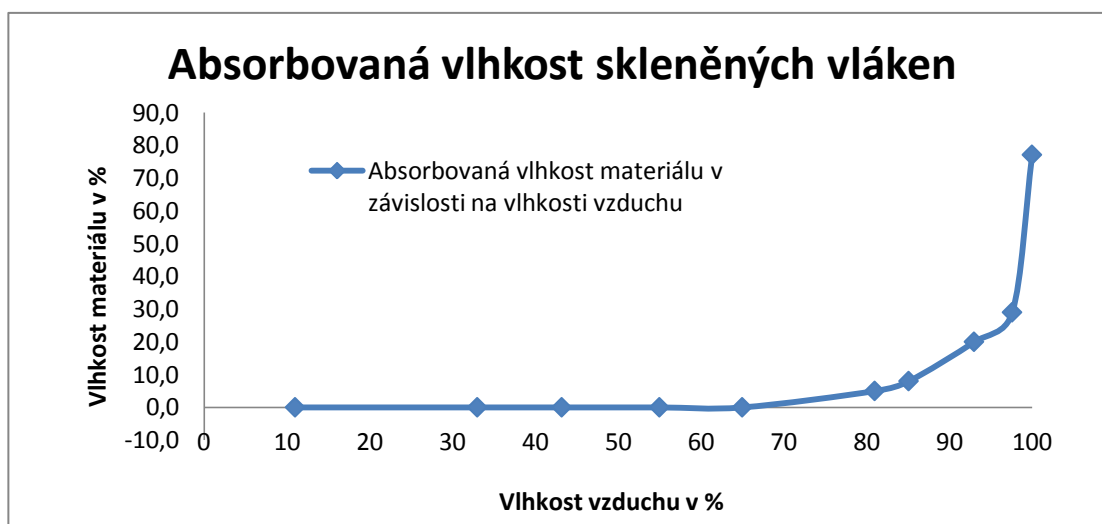
Graf 1.: Absorbovaná vlhkost vzorku A



Skleněná vlákna

Tab. 6.: Tabulka absorbované vlhkosti skleněných vláken

patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	77,1	29,0	20,0	8,0	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0



Graf 2.: Absorbovaná vlhkost skleněných vláken

Pozn.: zde jsou uvedeny pouze dva z testovaných materiálů, další obrázky z testování viz příloha (grafy: 1, 4, 9, 12, 15, 23, 26, 29).

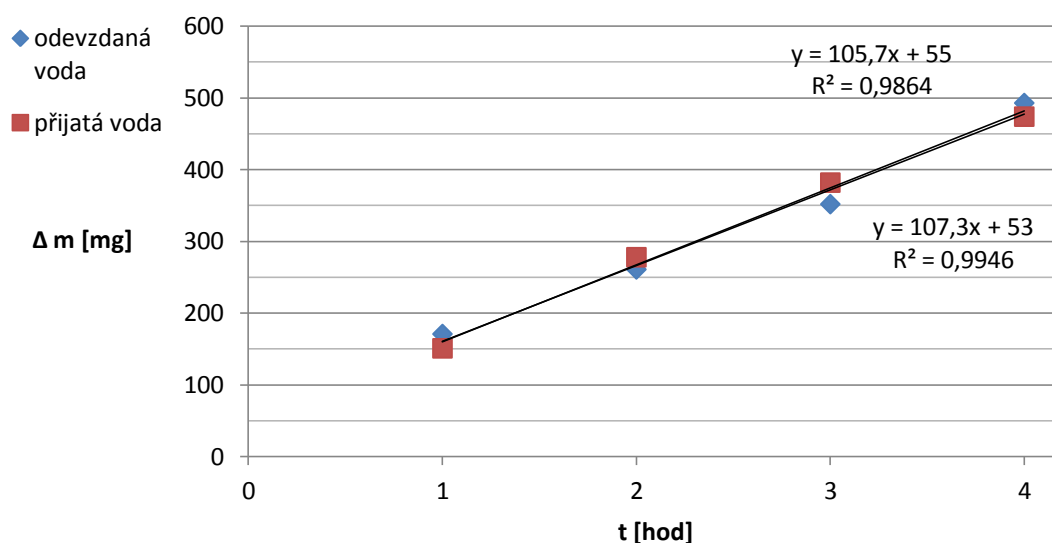
3.2 Testování průchodu vlhkosti

Čtyřhodinový pokus s průběžným otvíráním víka (po 1 hodině).

Množství předané hmoty v miligramech jako funkce času.

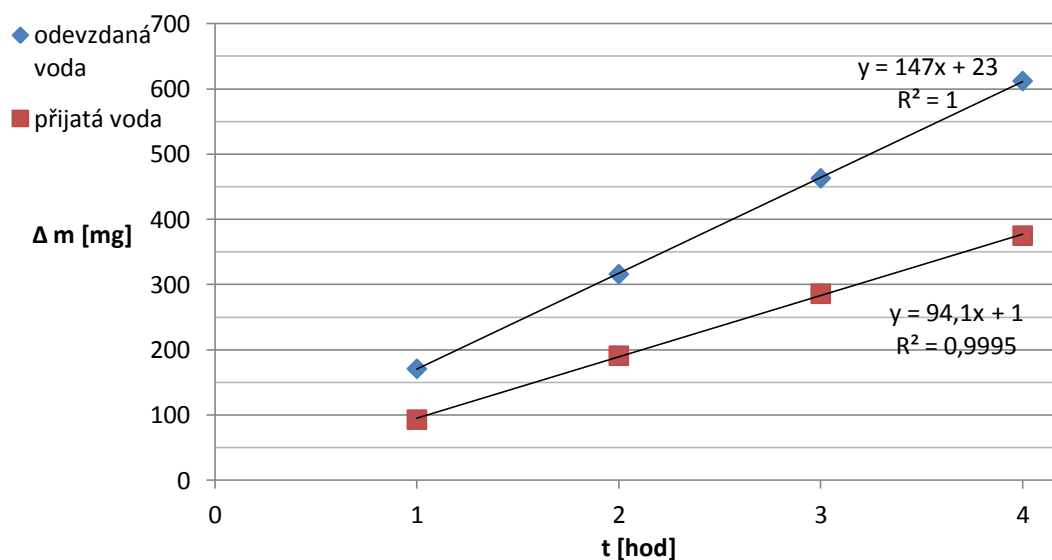
Vzorek A

- Transportovaná hmotnost vody



Graf 3.: Odevzdaná a přijatá hmotnost vody vzorku A

Skleněná vlákna

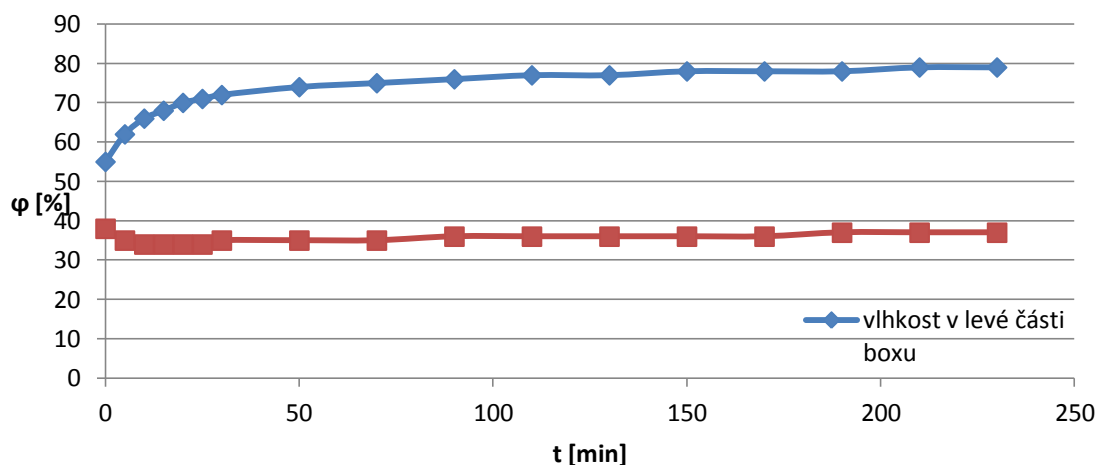


Graf 4.: Odevzdaná a přijatá hmotnost vody skleněných vláken

Poznámka: Zde jsou uvedeny pouze dva grafy vybraných materiálů, další grafy ostatních materiálů viz příloha (grafy: 2, 5, 8, 10, 13, 16, 24, 27).

Měření vlhkostních parametrů v testacím prostoru - Čtyřhodinový pokus bez otvírání víka.

Vzorek A

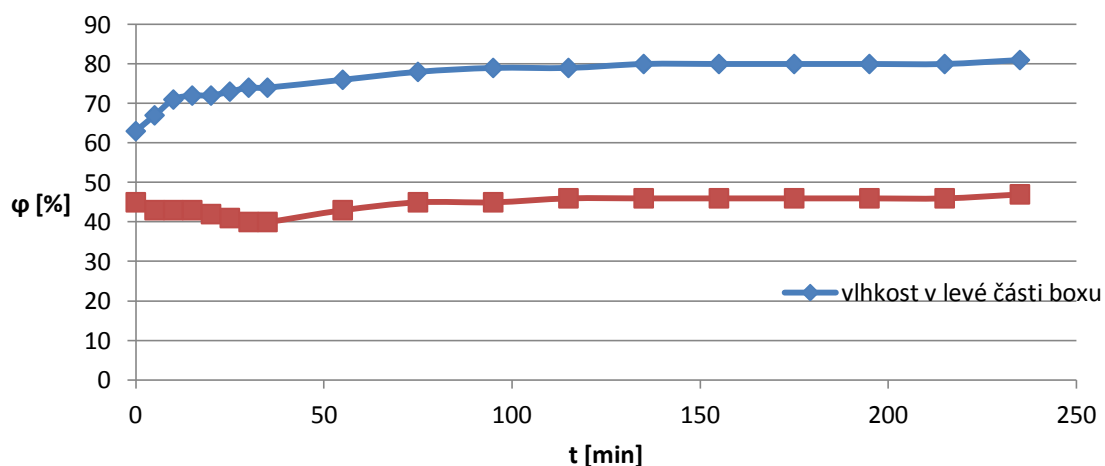


Graf 5.: Narůstající vlhkost v levé části boxu a klesající vlhkost v pravé části boxu.

Analýza vlhkosti	Relativní vlhkost vzduchu 60 min	Relativní vlhkost vzduchu 240 min	Min relativní vlhkost – čas min	Min relativní vlhkost – vlhkost %
Prostor A	35	38	25	32
Prostor B	74	79	-	-

Tab. 7.: Číselná analýza

Nanovlákná



Graf 6.: Narůstající vlhkost v levé části boxu a klesající vlhkost v pravé části boxu.

Analýza vlhkosti	Relativní vlhkost vzduchu 60 min	Relativní vlhkost vzduchu 240 min	Min relativní vlhkost – čas min	Min relativní vlhkost – vlhkost %
Box A	44	48	35	40
Box B	77	81	-	-

Tab. 8.: Číselná analýza

Poznámka 1. : ke grafům 5, 6 a tabulkám 7 a 8: levá část boxu= prostor A;

pravá část boxu= prostor B

Poznámka 2.: Zde jsou uvedeny pouze dva grafy vybraných materiálů, další grafy ostatních materiálů viz příloha (grafy: 3, 6, 11, 14, 17, 25, 28, 30).

U nově vytvořených membrán bylo zjištěno následující:

- Výpočet mokrého přivažku
- Stanovení sorpční izotermy

A dále byly pořízeny snímky z elektronové mikroskopie.

Mokrý přivažek

materiál	mokrý přivažek v %
1A	89,6
1B	90,0
2A	89,8
2B	89,4
3A	89,6
3B	89,8

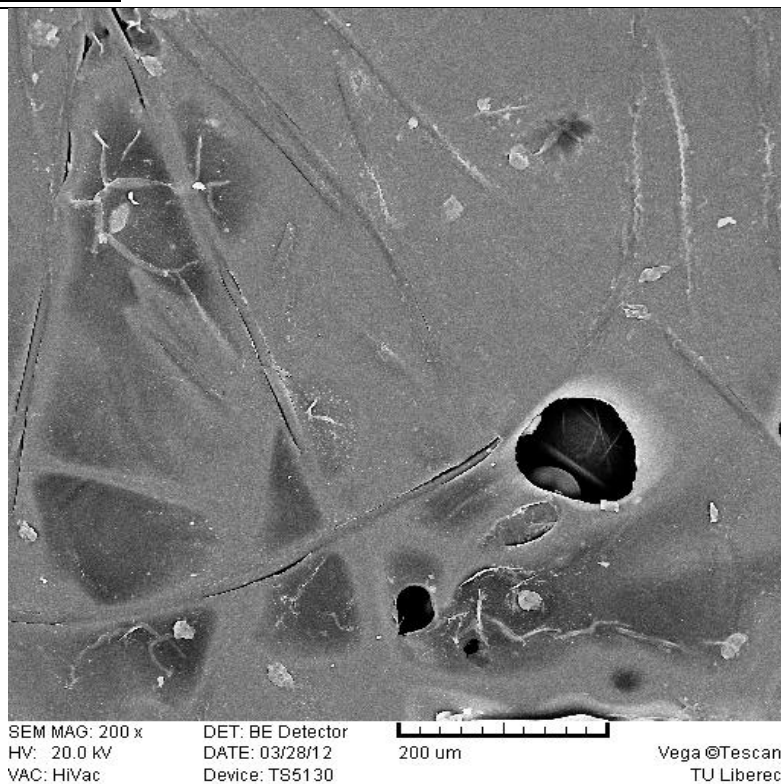
Tab. 9.: Tabulka ukazující mokrý přivažek v procentech.

3.3 Elektronová mikroskopie

Obr. 28.:

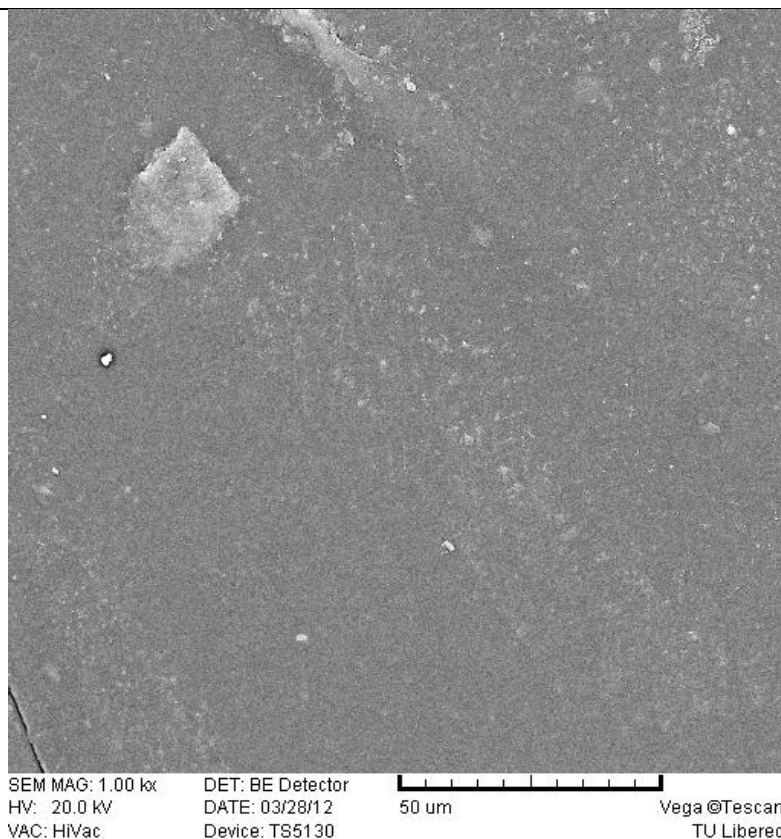
Vzorek 1A

Polymer + 1x nános
síťovacího
prostředku + 1x
fulár



Obr. 29.:

Vzorek 1A- detail

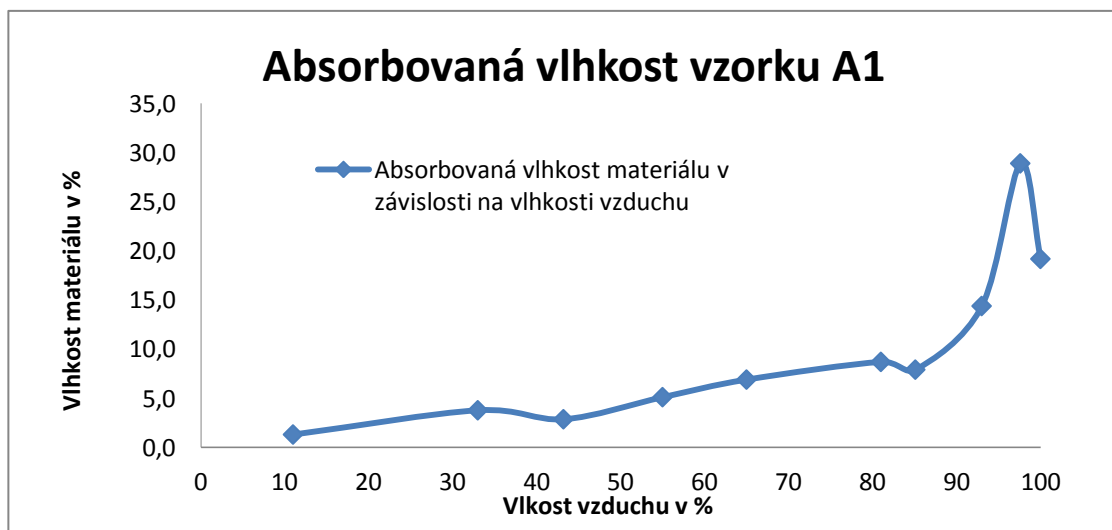


Poznámka: zde je uveden pouze jeden materiál, další snímky z elektronové mikroskopie, další snímky těchto materiálů viz příloha (obr.: 7, 8, 9, 10, 11).

Sorpční izotermy

Tab. 10.:

patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	19,2	28,9	14,4	7,9	8,7	6,9	5,1	2,9	3,8	1,3



Graf 7.: Absorbovaná vlhkost vzorku A1

Poznámka: Zde jsou uvedeny pouze jeden graf z testovaných materiálů, další grafy ostatních materiálů viz příloha (grafy: 18, 19, 20, 21, 22).

4 Závěr:

Tato práce byla zaměřena v rámci experimentů na teplosměnné a vlhkosměnné materiály. Ty byly otestovány na základě nově navržené testovací metody pro transport vlhkosti za podmínek, předpokládaných ve výměníku resp. na jeho teplosměnné ploše. Dále byly stanoveny sorpční izotermy, vyhodnoceny vlastnosti komerčních vzorků a dalších testovaných materiálů včetně nově vyvíjených membrán.

Byla navržena nová metodika měření transportu vlhkosti, na základě jejichž výsledků můžeme porovnat transport vlhkosti všech testovaných materiálů.

Podstatou experimentu byla speciální měřicí aparatura tvořená dvěma prostory oddělenými testovaným vzorkem. V jednom ze sousedících prostorů byla vysoká relativní vlhkost vzduchu zajišťovaná odparem z destilované vody. V druhém prostoru byla zajištěna nízká relativní vlhkost vzduchu zajišťovaná přítomností sušidla/silikagelu. Zařízení umožňovalo kontinuálně sledovat dynamické změny vlhkosti vzduchu a teploty v čase. Množství transportované vlhkosti bylo sledováno hmotnostně a vyžadovalo přerušení experimentu.

Výhodou roztoků ve směsi s pevnými částicemi (v našem případě voda a silikagel), které byly použity je, že tento systém byl schopen jak vlhkost absorbovat, tak i vypouštět do svého okolí v závislosti na okolních podmínkách. Proto také tato vlastnost byla využita v konstrukci tohoto nově navrženého zařízení. Pokud byla např. v prostoru A vyšší vlhkost než v prostředí B a testovaná membrána byla propustná pro vodu, pak vlivem transportu vody z prostoru A do B dochází ke změně hmotnosti nasyceného roztoku soli, kterou je možno detekovat jednoduše vážením.

Průměrná relativní vlhkost vzduchu se ukázala být užitečná v transportní reakci z hlediska koncentrace závisující na koeficientu propustnosti.

Na základě výsledků a dalšího testování byl navržen nový materiál, u kterého byly zjištěny jak dobré mechanické vlastnosti, tak i dostatečná tloušťka a díky tomu lze předpokládat, že i dobré transportní vlastnosti.

Principem nově vyvíjených materiálů- membrán, u kterých byl základ tvořen polypropylenovými nanovlásky, a jejichž porozita byla snížena karboxymethylcelulózou (CMC), bylo zvýšení sorpce vody a právě díky vysoké

schopnosti pohlcovat vodu mohou takto upravené materiály transportovat vlhkost do okolí.

Součástí experimentů bylo také stanovení sorpčních izoterem materiálů. Z hlediska sorpce materiálů se komerční vzorky A, B, C a ZM chovaly velmi podobně a z ostatních materiálů se jim přiblížily skleněná vlákna a nanovlákna. Stanovené izotermy nově vyvíjených materiálů měly také pozitivní výsledky, avšak jejich testovací plocha byla nedostatečně velká.

Ze všech testovaných materiálů by se mohly, jako materiály do výměníků uplatnit zejména vzorky A, B, C, které vyšly parametricky i co se týče vlastností a testování nejlépe. Z dalších vlákenných materiálů, které by se mohly takto uplatnit jsou nanovlákna, jejichž výsledné parametrické vlastnosti jsou velmi podobné komerčním vzorkům A, B, C.

U nově navržených materiálů, které by mohly být alternativním řešením a uplatnit se v konstrukci výměníků je nutné další testování a vývoj, i když bylo dosaženo laboratorně vyhovujících výsledků.

5 Seznam použité literatury:

- [1] Obecné informace o membránových procesech. *Česká membránová platforma* [online]. [2010- 2012] [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://www.czemp.cz/cs/membranove-procesy/obecne-informace-o-membranovych-procesech>
- [2] NASEF, Mohamed. M. a El-Sayed A. HEGAZY. Preparation and applications of ion exchange membranes by radiation-induced graft copolymerization of polar monomers onto non-polar films. *Progress in Polymer Science* [online]. 27.4.2004 [cit. 2012-05-07]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079670004000048>
- [3] Membránové materiály. *Česká membránová platforma: Membránové procesy: Membránové materiály* [online]. [2010- 2012] [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://www.czemp.cz/cs/membranove-procesy/membranove-materialy>
- [4] S.J. METZ, W.J.C. VAN DE VEN, J. POTRECK, M.H.V. MULDER a M. WESSLING. Transport of water vapor and inert gas mixtures through highly selective and highly permeable polymer membranes. *ScienceDirect: Journal of Membrane Science* [online]. 15 December 2004 [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376738804007379>
- [5] ÚSTAV MAKROMOLEKULÁRNÍ CHEMIE AV ČR. Membránové technologie. *Oddělení Polymerní membrány: Membránové technologie* [online]. [2008] [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: http://www.imc.cas.cz/cz/umch/o_membr.htm
- [6] Membrane Basics. *Membranes 101* [online]. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: http://www.cdr.wisc.edu/programs/dairyingredients/pdf/membranes_101.pdf
- [7] PIENTKA, RNDr. Zbyněk, CSc. Nové polymerní materiály pro membránové procesy. *Ústav makromolekulární chemie AV ČR* [online]. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://www.imc.cas.cz/cz/umch/an207Pie.htm>
- [8] Separace plynů a par. *Membránové procesy* [online]. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://www.czemp.cz/cs/membranove-procesy/separace-plynu-a-par>
- [9] GIBSON, Phillip W. Effect of temperature on water vapor transport through polymer membrane laminates. *Polymer Testing* [online]. USA [2000] [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142941899000409>
- [10] BLAHNÍK, Roman a Věra PREININGEROVÁ. *Problémy navlhávání a matematické stanovení vlhkostních polí v plastických hmotách: Úvod*. Praha: Academia, [1976]
- [11] BLAHNÍK, Roman a Věra PREININGEROVÁ. *Problémy navlhávání a matematické stanovení vlhkostních polí v plastických hmotách: Aplikace difúzní rovnice na reálné systémy*. Praha: Academia, [1976].

- [12] HOVORKA, Ing. Franřišek, CSc. *Technologie chemických látek: Difúzní operace*. Praha: Vysoká škola chemicko- technologická v Praze, 2005.
- [13] KUBÁČEK, Pavel a Zdena MICHALIČKOVÁ. Transport látky. *Základy fyzikální chemie* [online]. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity [2004, s. 1, 2011 [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: http://is.muni.cz/do/rect/el/estud/prif/js11/fyz_chem/web/dynamika/transport.htm
- [14] LABÍK, Stanislav, Michal BUREŠ, Josef NOVÁK, Pavel CHUCHVALEC, Jiří KOLÁFA a Karel ŘEHÁK. Fickův zákon. *Kinetika fyzikálních dějů* [online]. Praha [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <http://www.vscht.cz/fch/prikladnik/prikladnik/p.9.1.html>
- [15] Loužení: Kinetika procesu rozpouštění. *Chemické metody zpracování nerostných surovin a odpadů* [online]. [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://hgf10.vsb.cz/546/Chemproc/>
- [16] VÁVROVÁ, Jaroslava. Zákony difúzní (první Fickův zákon difúze, druhý Fickův zákon difúze): Difúze. *Zákony difúzní (první Fickův zákon difúze, druhý Fickův zákon difúze)* [online]. [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <http://oldweb.izip.cz/ds3/hypertext/JVAFT.htm>
- [17] RUBINA, Doc. Ing. Aleš, Ph.D., Ing. Zdeněk TESAŘ a Bc. Petr BLASINSKI. Modelování fyzikálních jevů 1 - Odpar z vodní hladiny: Teorie přenosu vlhkosti. *Větrání a klimatizace* [online]. 28.11.2011, 28.11.2011 [cit. 2012-04-05]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/8076-modelovani-fyzikalnich-jevu-1-odpar-z-vodni-hladiny>
- [18] Sorpční vlastnosti vláken: Základní pojmy. STUDIJNÍ MATERIÁLY KATEDRY TEXTILNÍCH MATERIÁLŮ. *Technická univerzita v Liberci Katedra textilních materiálů* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, [2004- 2005] [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/VlastnostiVlaken-prednaska8.pdf>
- [19] Transport vodní páry porézním prostředím. *Transport plynné a kapalné vody* [online]. [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/MAIN/cviceni4.pdf>
- [20] HEJHÁLEK, Jiří. Difúze vodní páry v konstrukci. *Tepelná izolace* [online]. březen 2005 [cit. 2012-04-06]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/difuze-vodni-pary-v-konstrukci/>
- [21] Moisture Sorption Isotherms. *Aqua Lab: Education* [online]. USA [2012], 2012 [cit. 2012-04-04]. Dostupné z: <http://www.aqualab.com/education/moisture-sorption-isotherms/>
- [22] WATER SORPTION ISOTHERMS. [online]. [cit. 2012-02-04]. Dostupné z: <http://www.rpi.edu/dept/chem-eng/Biotech-Environ/Porto/CRISTINA/ISOTHERM.HTM>
- [23] SORPČNÍ IZOTERMY VLHKOSTI. [online]. [cit. 2012-04-02]. Dostupné z: http://user.mendelu.cz/stencil/frvs_2196-2008/pdf/04_sorpcni_izotermny.pdf

[24] PALEČEK, Mgr. Stanislav. Blower door test průvzdušnosti budov - detekční metody. *Stavebnictví, úspory energií, technická zařízení budov* [online]. 19.2.2007 [cit. 2012-04-10]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3896-blower-door-test-pruvzdusnosti-budov-detekcni-metody>

[25] Větrání a teplovzdušné vytápění: Zpětný zisk tepla - rekuperace. *Centrum pasivního domu* [online]. Brno [2006- 2010] [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://www.pasivnidomy.cz/pasivni-dum/vnitri-prostredi-domu/vetrani-a-teplovzdušne-vytapeni.html?chapter=zpetny-zisk-tepla-rekuperace>

[26] Blower door test: Požadavek na omezení průvzdušnosti pláště. *Dřevostavby- info* [online]. [cit. 2012-04-07]. Dostupné z: <http://www.hlc.cz/drevostavby-info/stavba-krok-za-krokem/blower-door-test.html>

[27] HEMERKA, Doc.Ing. Jiří, CSc. a Ing. Pavel, Ph.D. VYBÍRAL. *Filtrace atmosférického vzduchu*. Praha: České vysoké učení technické v Praze.

[28] Metodika hodnocení prodyšnosti plošných textilií. *Přístroje pro textilní metrologii* [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/2Pristroje/2.1_zaverecne_zpravy/%5B2.1.01%5D.pdf

[29] Digitální tloušťkoměr. [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://www.kod.tul.cz/predmety/OM1/Cviceni/TLOUSTKOMER.pdf>

[30] *Infračervená spektroskopie* [online]. [cit. 2012-05-01]. Dostupné z: <http://lms.vscht.cz/Zverze/Infrared.htm>

[31] Měření vlhkosti vzduchu. [online]. [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: <http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/cviceni/Navody%20na%20cviceni/07.Mereni%20vlhkosti.pdf>

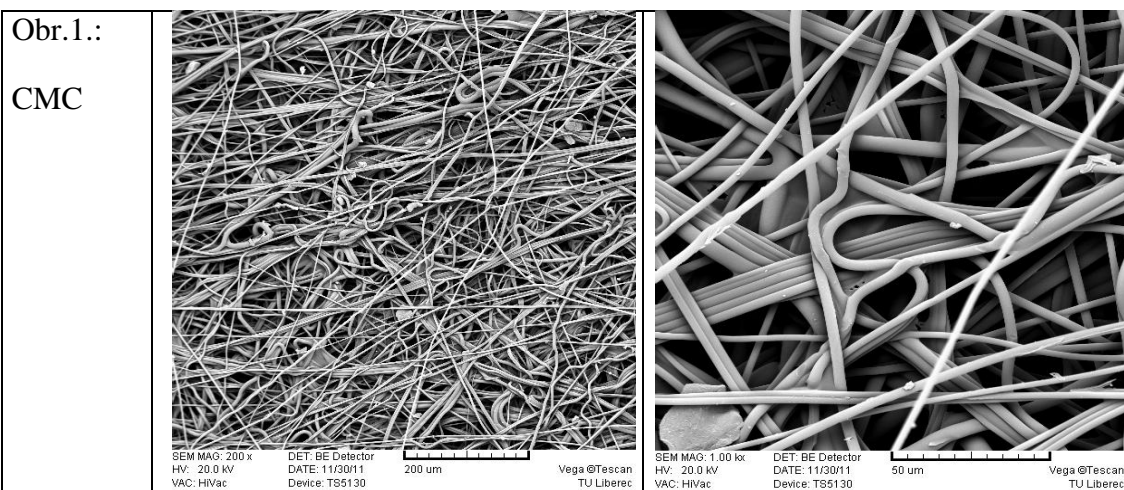
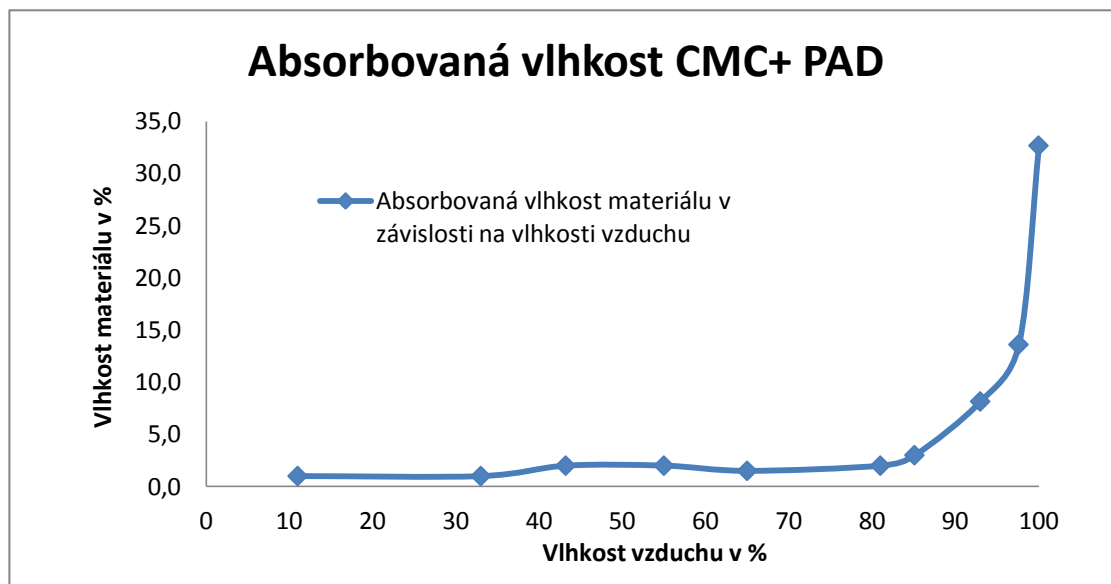
6 Přílohy:

CMC+ PAD

Tab. 1.:

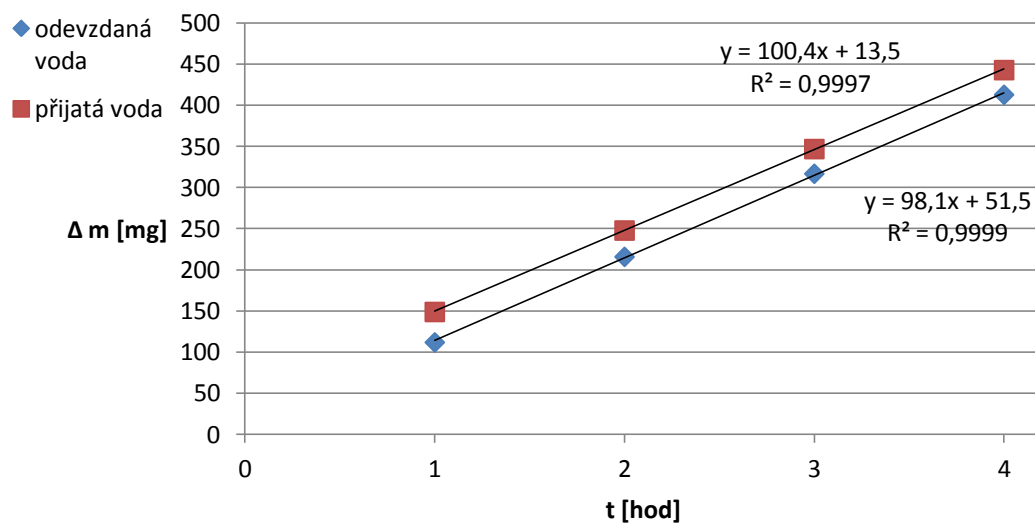
patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	32,7	13,6	8,1	3,0	2,0	1,5	2,0	2,0	1,0	1,0

Graf 1.:



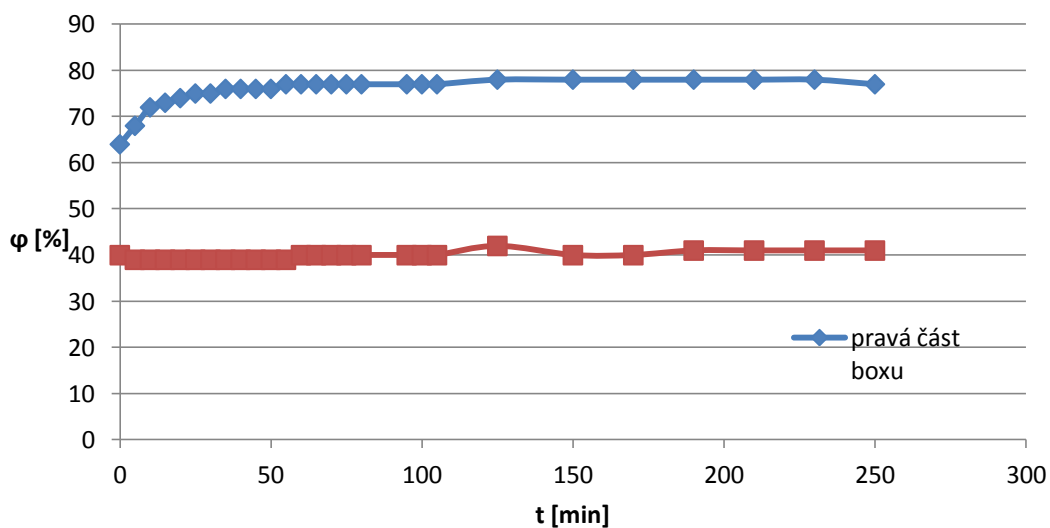
Graf 2.:

Transportovaná hmotnost vody PES vláken napuštěných CMC



Graf 3.:

PES+ CMC- vlhkost v jednotlivých boxech- prostor A a B



Tab. 2.: Číselná analýza

Analyzá vlhkosti	Relativní vlhkost vzduchu 60 min	Relativní vlhkost vzduchu 240 min	Min relativní vlhkost – čas min	Min relativní vlhkost – vlhkost %
Box A	39	41	100	39
Box B	78	79	-	-

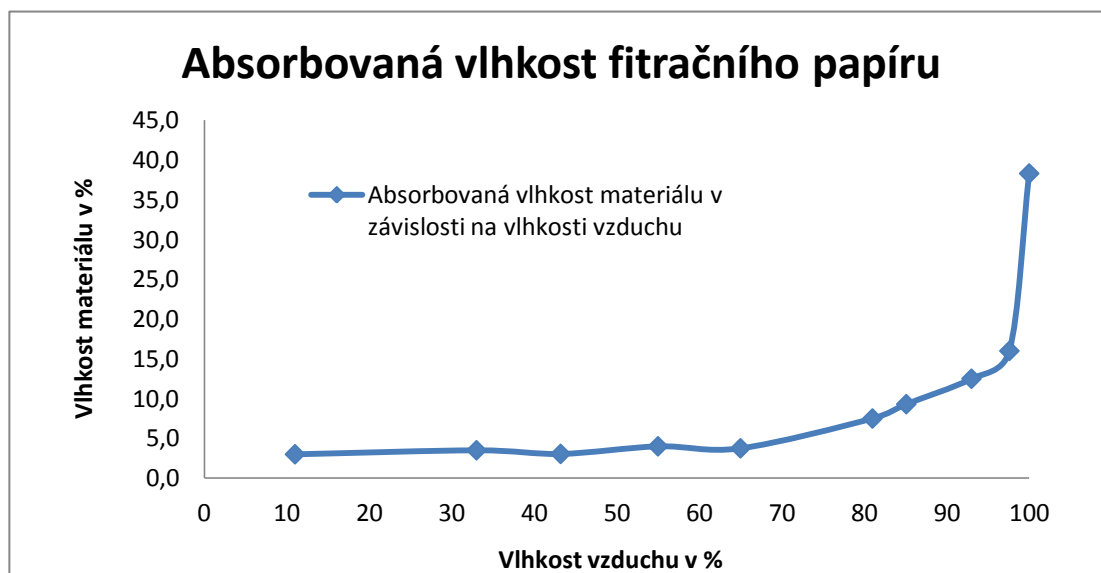
Poznámka ke grafu 3 a tabulce 2: levá část boxu = prostor A;
pravá část boxu = prostor B

Filtrační papír

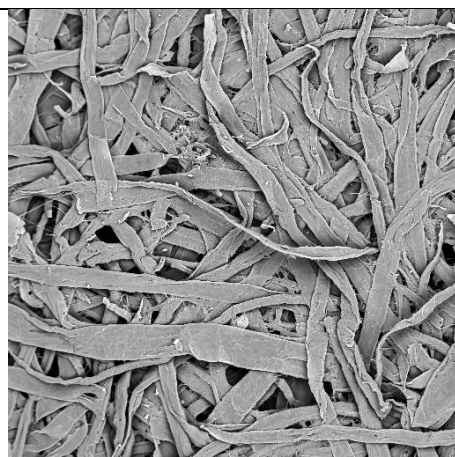
Tab. 3.:

patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	38,3	16,0	12,5	9,3	7,5	3,8	4,0	3,0	3,5	3,0

Graf 4.:



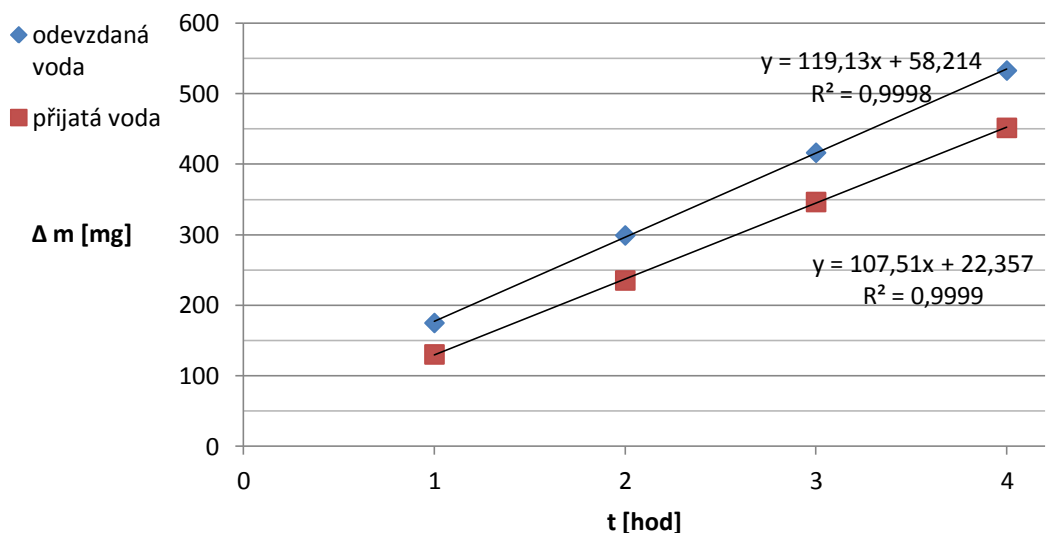
Obr. 2.:
Filtrační
papír



Filtrační papír

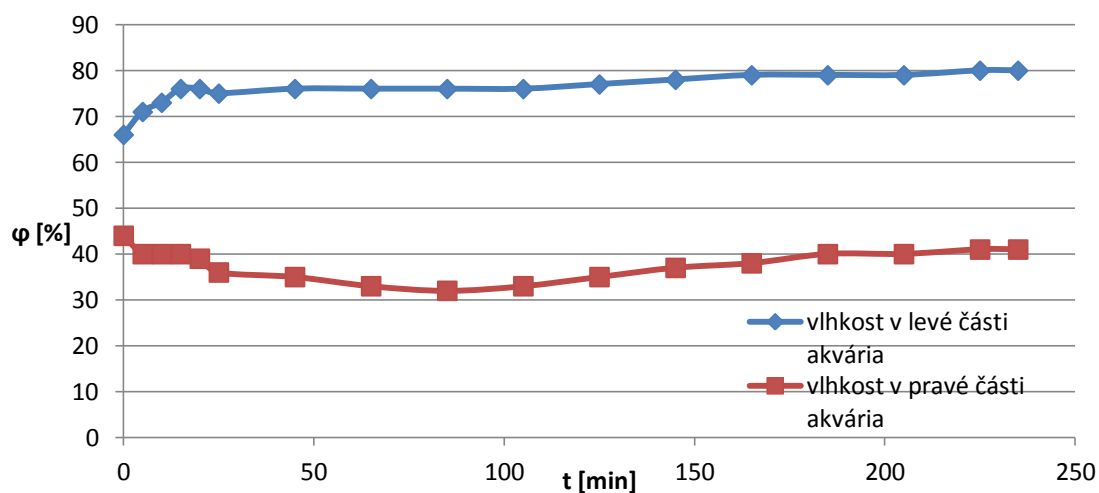
Graf 5.:

Transportovaná hmotnost vody filtračního papíru



Graf 6.:

Filtrační papír- vlhkost pravé a levé části boxu- prostor A a B



Tab. 4.: Číselná analýza

Analýza vlhkosti	Relativní vlhkost vzduchu 60 min	Relativní vlhkost vzduchu 240 min	Min relativní vlhkost – čas min	Min relativní vlhkost – vlhkost %
Box A	32	41	80	32
Box B	76	80	-	-

Poznámka ke grafu 6 a tabulce 4: levá část akvária = prostor A, Box A;
pravá část akvária = prostor B, Box B.

Nanovlákná

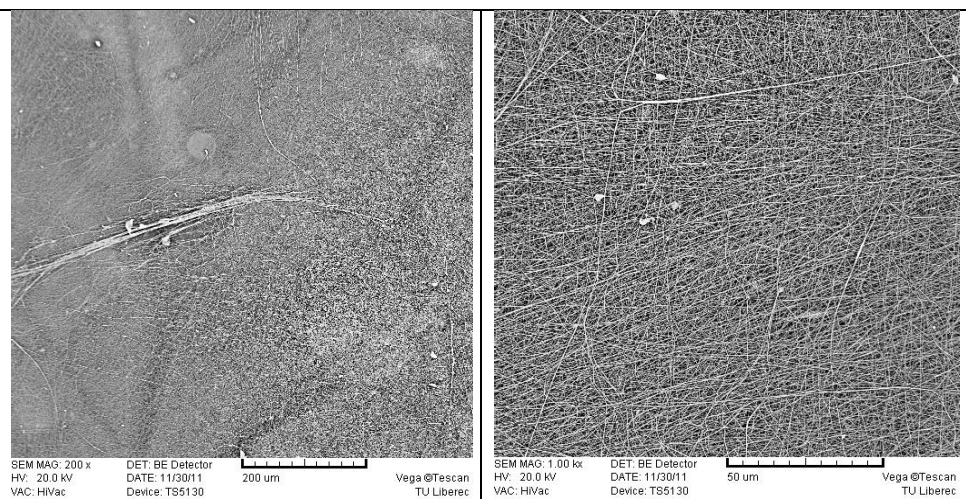
Tab. 5.:

patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	9,5	1,0	0,1	0,0	0,3	0,2	0,0	0,1	0,1	0,0

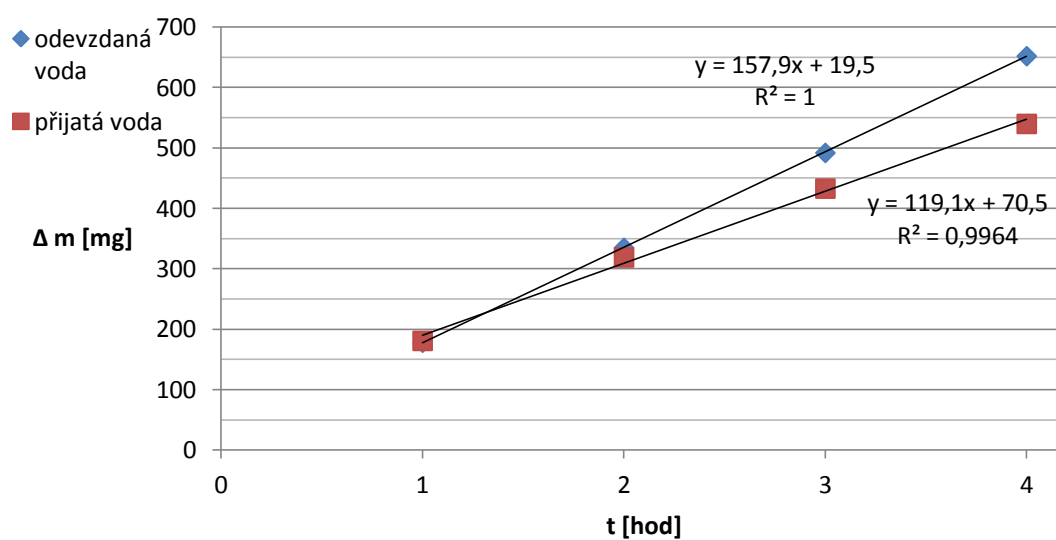
Graf 7.:



Obr. 3.:
Nanovlákná



Graf 8.:
Transportovaná hmotnost vody nanovláken



Vzorek B

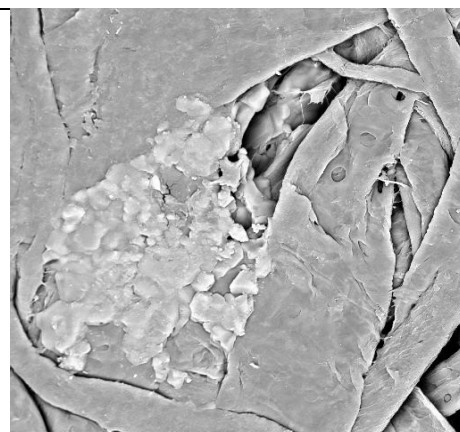
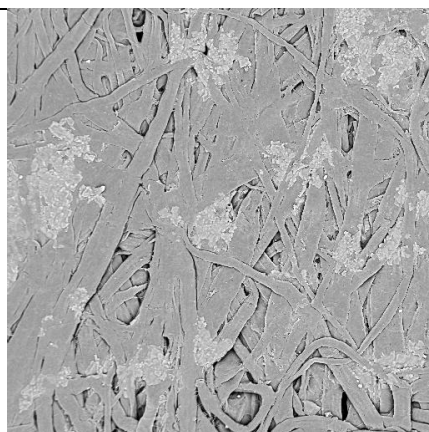
Tab.6.:

patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	63,1	56,9	30,3	10,9	9,2	6,0	3,2	4,0	3,1	3,8

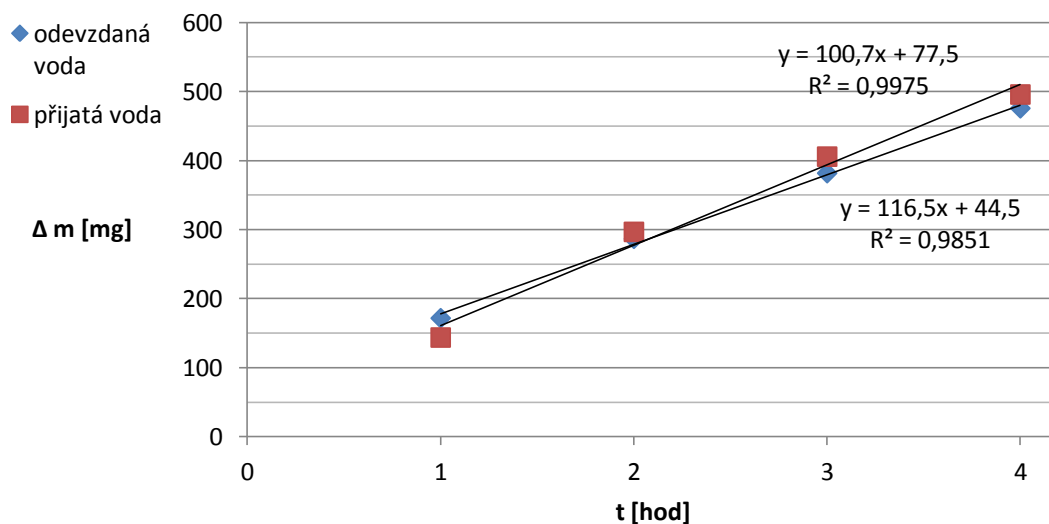
Graf 9.:



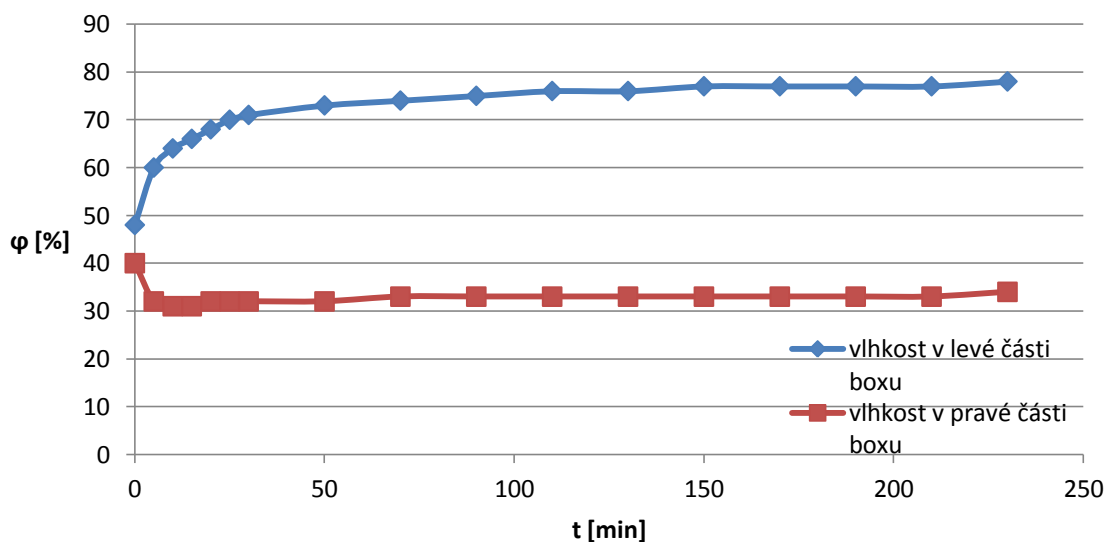
Obr. 4.:
Vzorek B



Graf 10.:
Transportovaná hmotnost vody vzorku B



Graf 11.:
Vlhkost vzorku B v jednotlivých boxech- prostor A a B



Tab. 7.: Číselná analýza

Analýza vlhkosti	Relativní vlhkost vzduchu 60 min	Relativní vlhkost vzduchu 240 min	Min relativní vlhkost – čas min	Min relativní vlhkost – vlhkost %
Box A	32	33	15	30
Box B	73	78	-	-

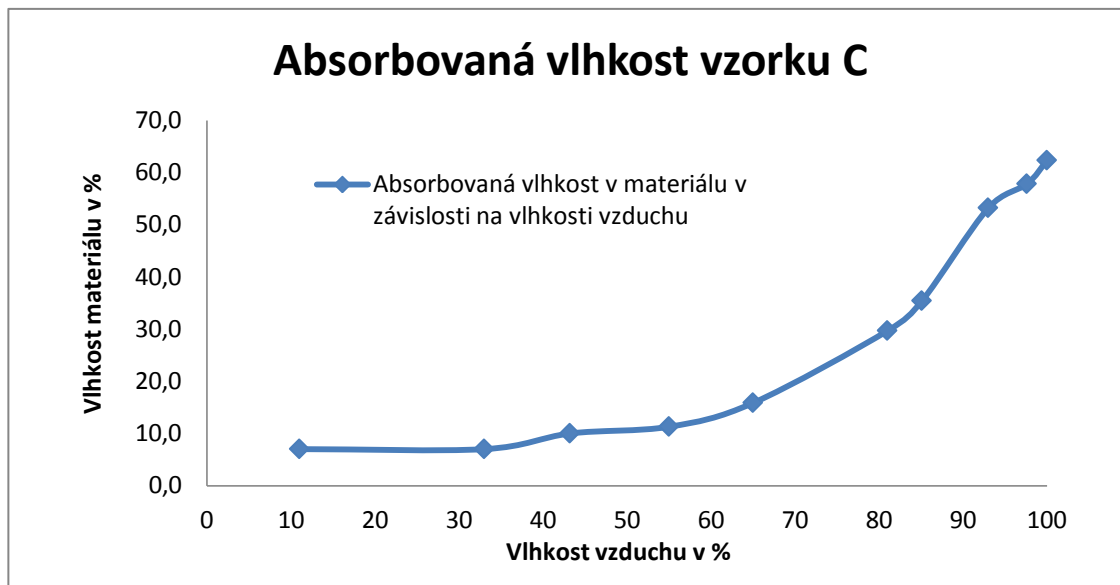
Poznámka ke grafu 11 a tabulce 7: levá část boxu = prostor A;
pravá část boxu = prostor B

Vzorek C

Tab. 8.:

patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	62,3	57,8	53,2	35,4	29,7	15,9	11,3	10,0	7,0	7,0

Graf 12.:



Obr. 5.:
Vzorek C

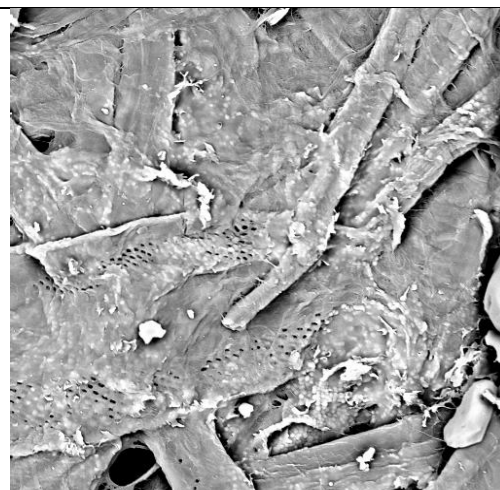


SEM MAG: 200 x
HV: 20.0 kV
VAC: HiVac

DET: BE Detector
DATE: 11/30/11
Device: TS5130

200 μm

Vega ©Tescan
TU Liberec



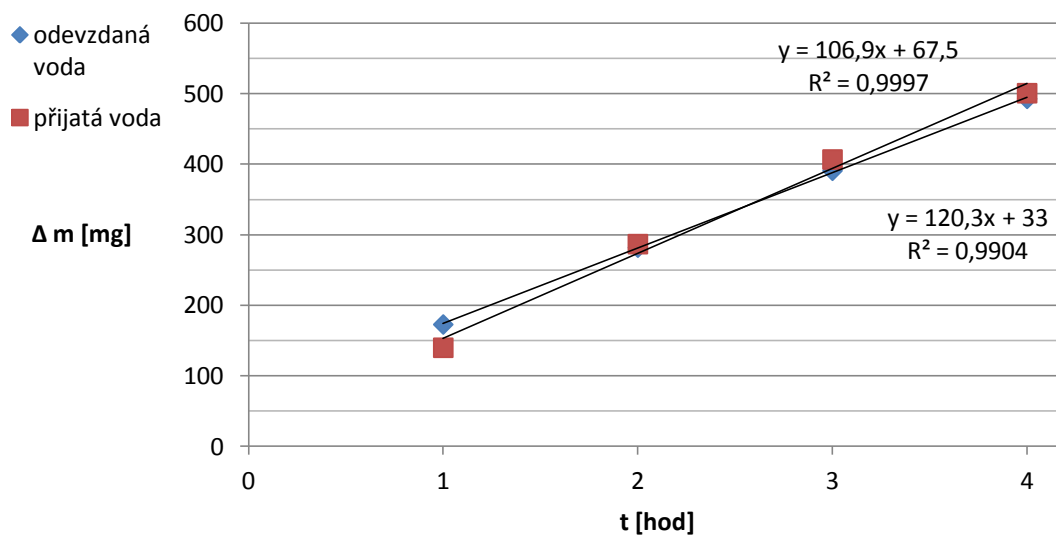
SEM MAG: 1.00 kx
HV: 20.0 kV
VAC: HiVac

DET: BE Detector
DATE: 11/30/11
Device: TS5130

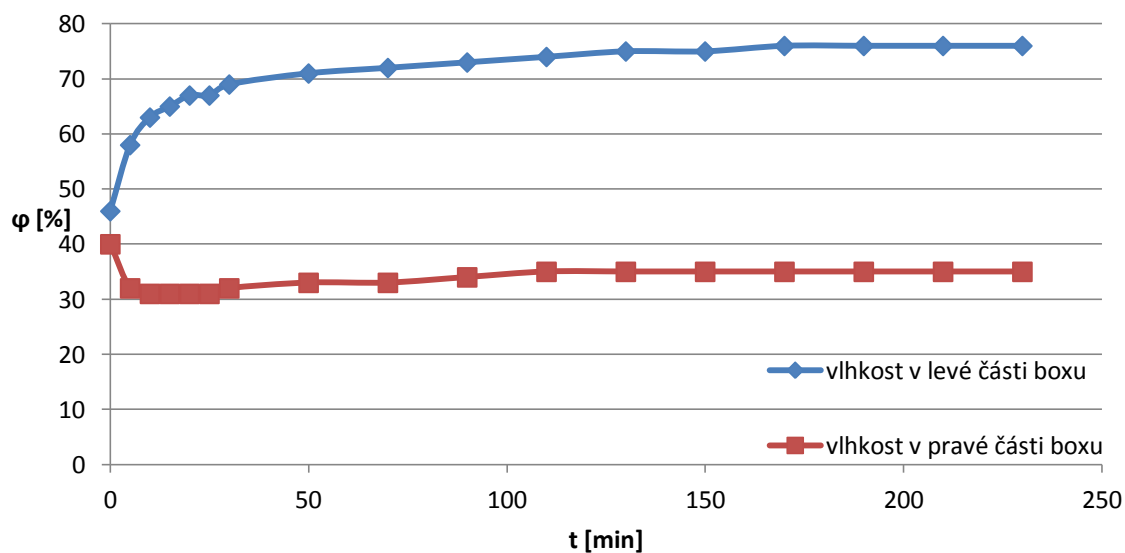
50 μm

Vega ©Tescan
TU Liberec

Graf 13.:
Transportovaná hmotnost vody vzorku C



Graf 14.: Vlhkost vzorku C v jednotlivých boxech- prostor A a B



Tab. 9.: Číselná analýza

Analýza vlhkosti	Relativní vlhkost vzduchu 60 min	Relativní vlhkost vzduchu 240 min	Min relativní vlhkost – čas min	Min relativní vlhkost – vlhkost %
Box A	33	35	15	31
Box B	72	76	-	-

Poznámka ke grafu 14 a tabulce 9: levá část boxu = prostor A;

pravá část boxu = prostor B

Zelenomodrý papír

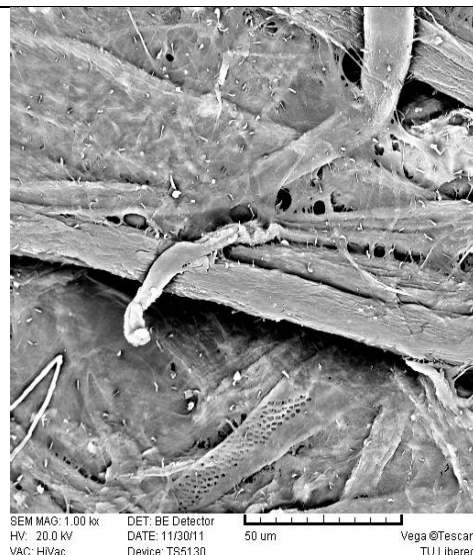
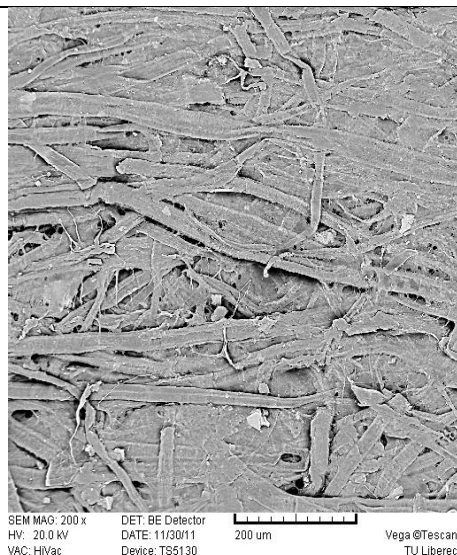
Tab. 10.:

patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	19,3	16,3	14,7	7,8	6,0	5,0	4,3	3,0	2,9	1,0

Graf 15.:



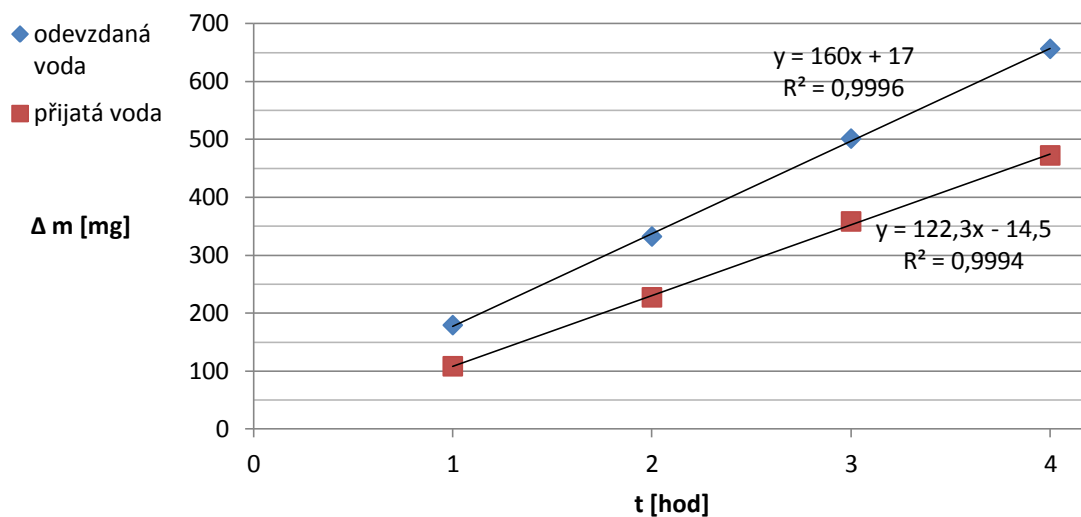
Obr. 6.:
Zelenomodrý
papír



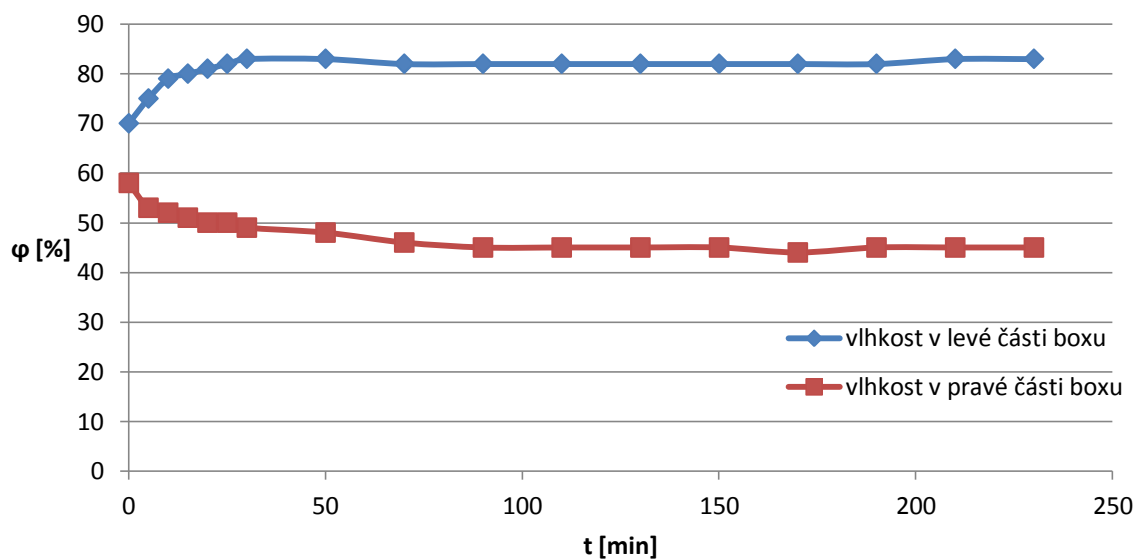
Zelenomodrý papír

Graf 16.:

- Transportovaná hmotnost vody



Graf 17.: Vlhkost zelenomodrého papíru v jednotlivých boxech- prostor A a B



Tab. 11.: Číselná analýza

Analýza vlhkosti	Relativní vlhkost vzduchu 60 min	Relativní vlhkost vzduchu 240 min	Min relativní vlhkost – čas min	Min relativní vlhkost – vlhkost %
Box A	37	45	90	44
Box B	82	82	-	-

Poznámka ke grafu 17 a tabulce 11: levá část boxu = prostor A;

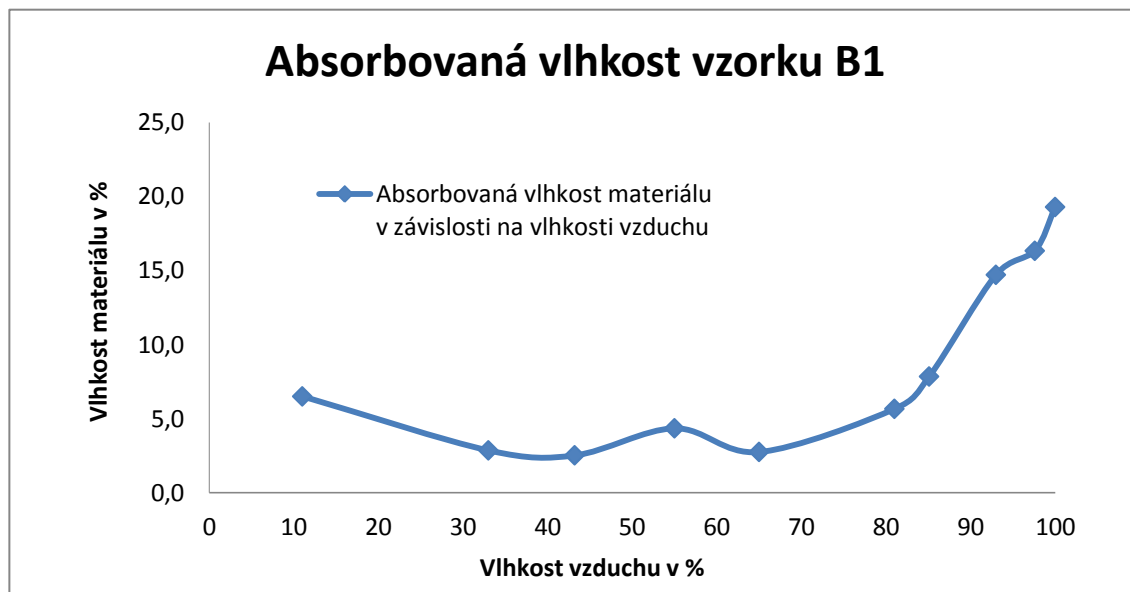
pravá část boxu = prostor B

Vzorek B1

Tab.12.:

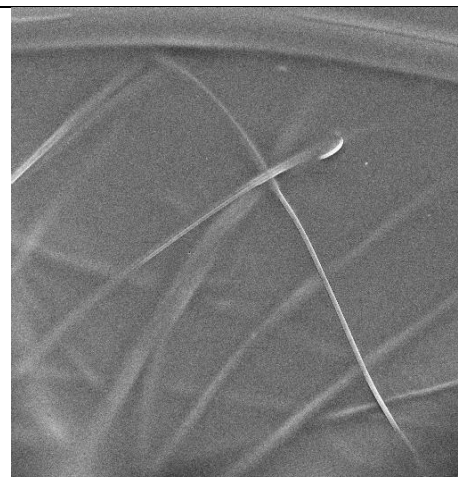
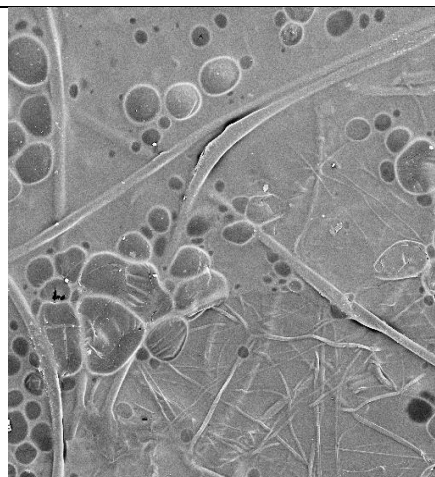
patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	19,3	16,3	14,7	7,8	5,7	2,8	4,3	2,5	2,9	6,5

Graf 18.:



Obr. 7.:
Vzorek 1B

Polymer+ 2x
nános
síťovacího
prostředku +
2x fulár

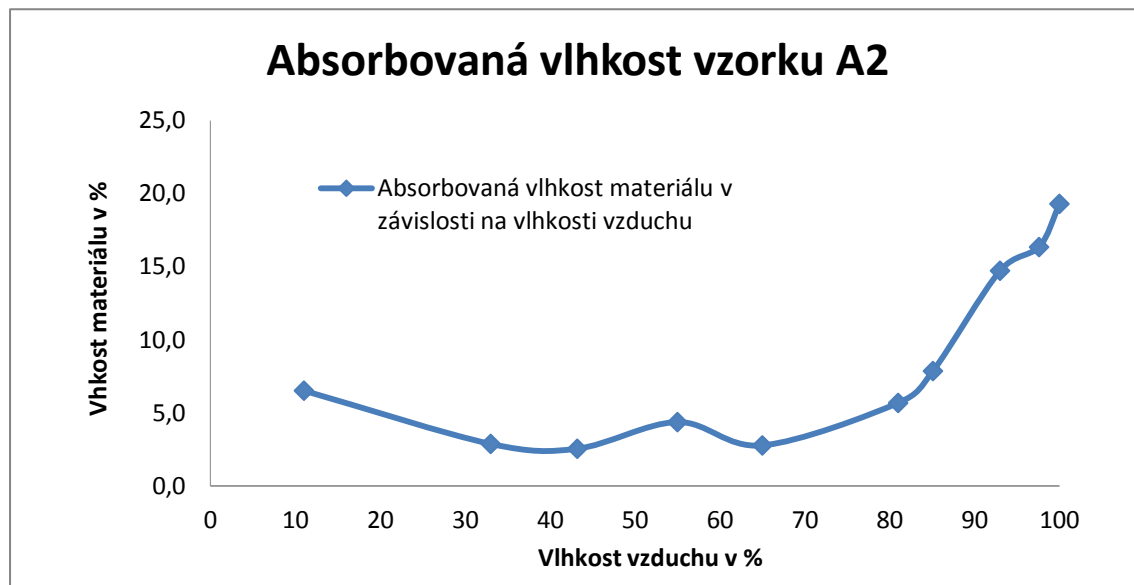


Vzorek A2

Tab.: 13

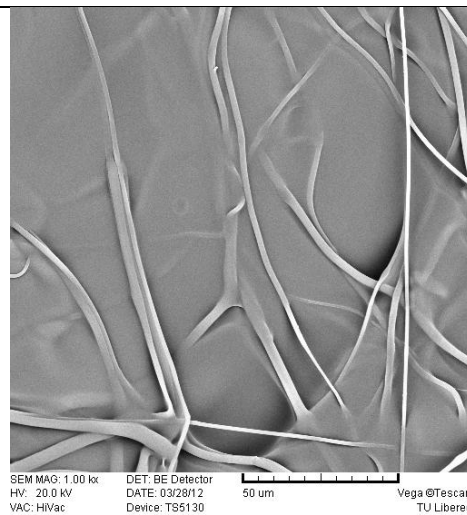
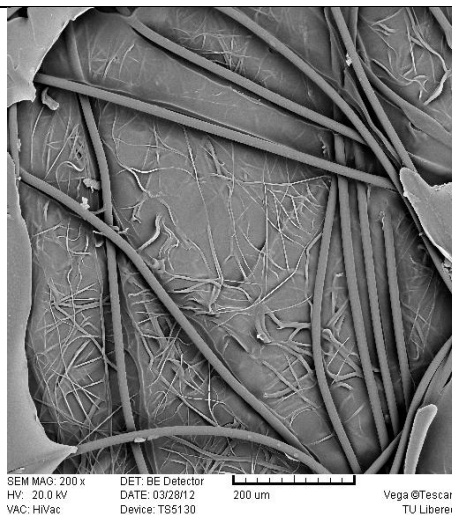
patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	19,3	16,3	14,7	7,8	5,7	2,8	4,3	2,5	2,9	6,5

Graf 19.:



Obr. 8.:
Vzorek 2A

Polymer+ 2x
nános
síťovacího
prostředku +
1 x fulár

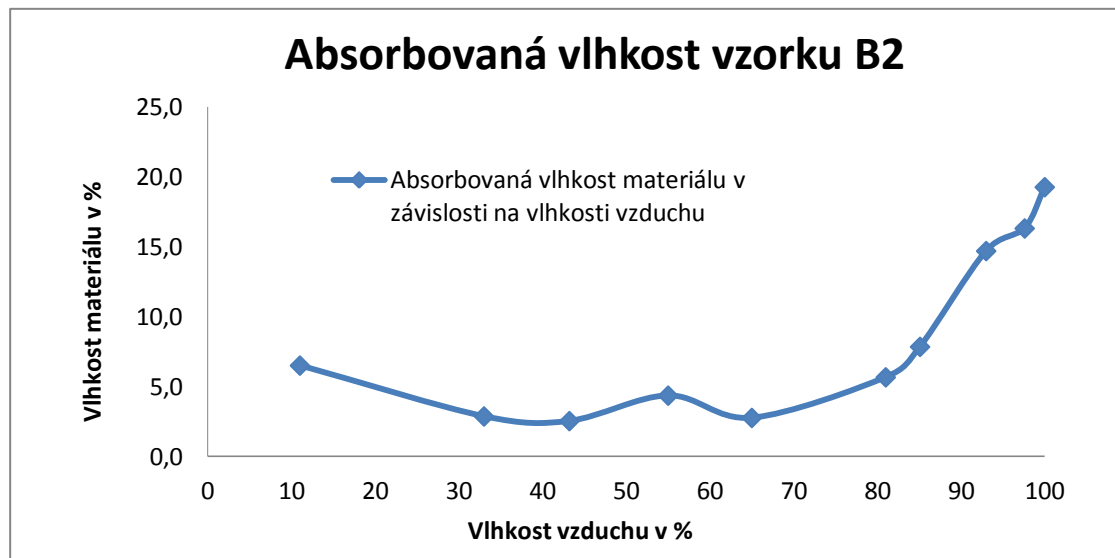


Vzorek 2B

Tab. 14.:

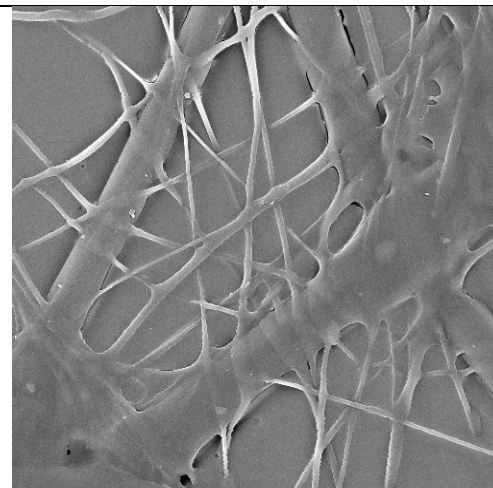
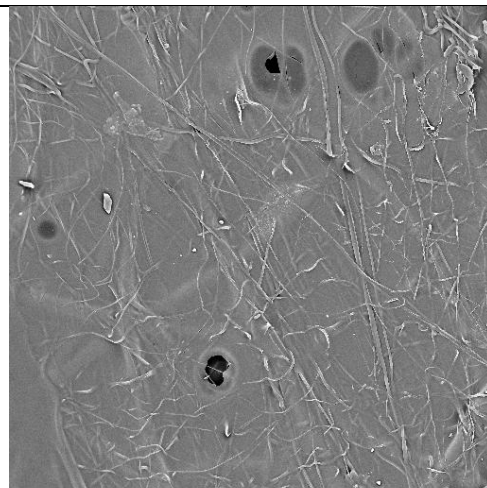
patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	19,3	16,3	14,7	7,8	5,7	2,8	4,3	2,5	2,9	6,5

Graf 20.:



Obr. 9.:
Vzorek 2B

Polymer+ 1x
nános
síťovacího
prostředku +
1x fulár

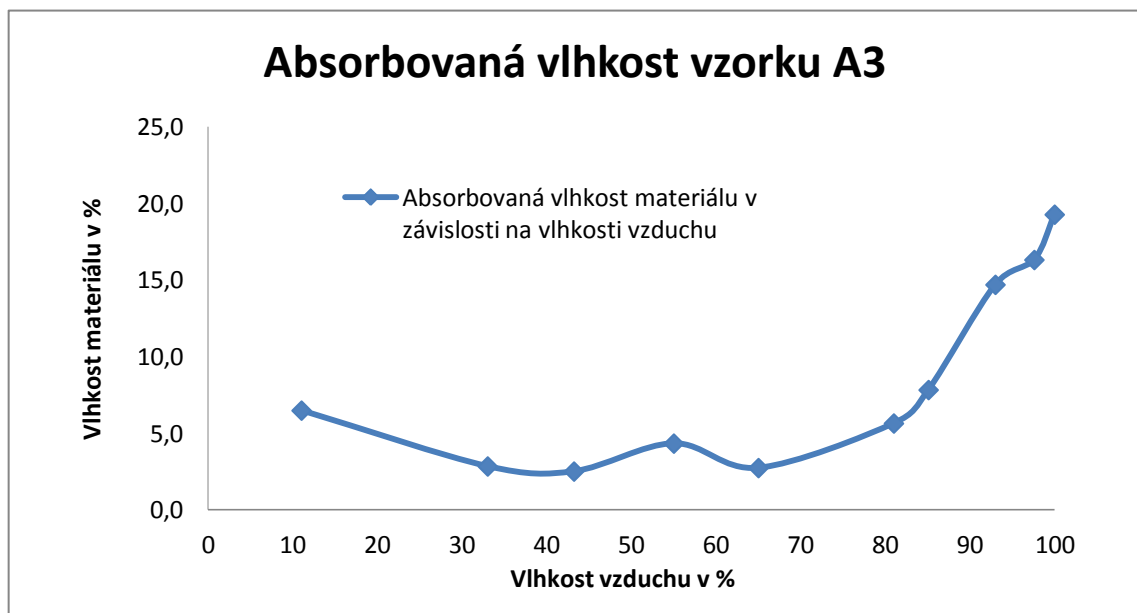


Vzorek 3A

Tab. 15.:

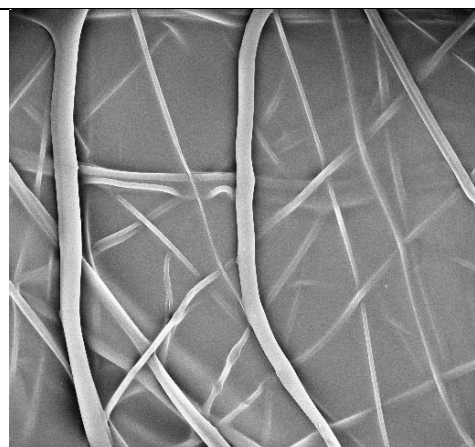
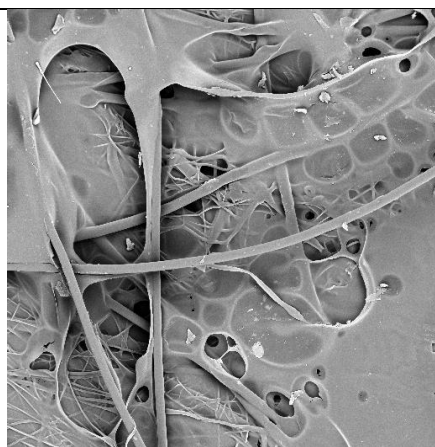
patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	19,3	16,3	14,7	7,8	5,7	2,8	4,3	2,5	2,9	6,5

Graf 21.:



Obr. 10.:
Vzorek 3A

Polymer+ 1x
nános
síťovacího
prostředku +
1x fulár

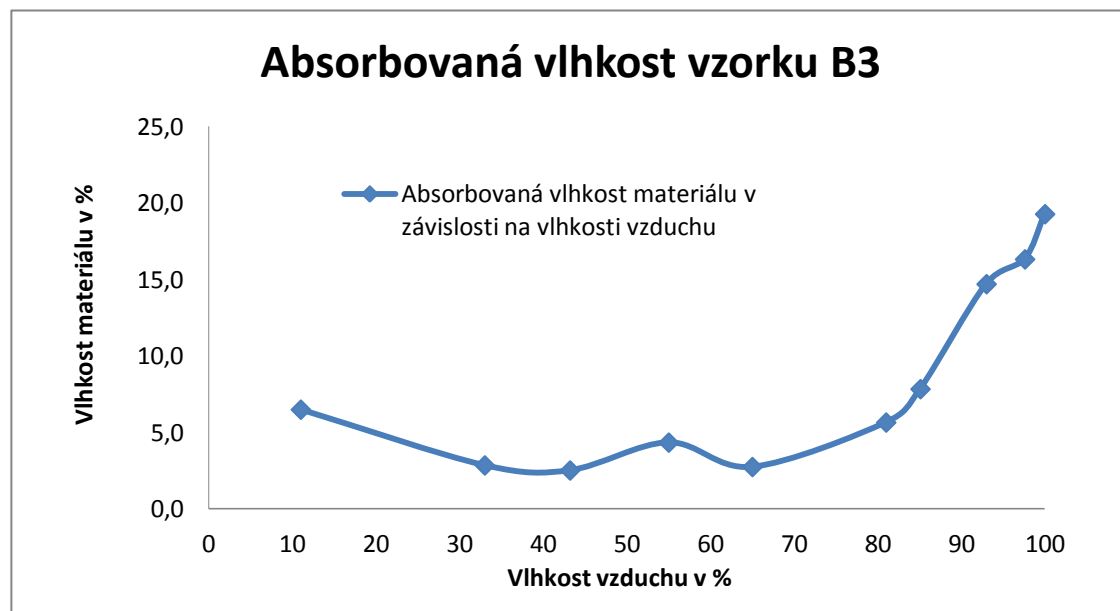


Vzorek 3B

Tab.: 16

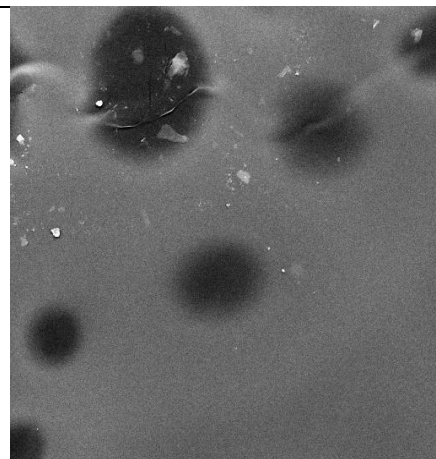
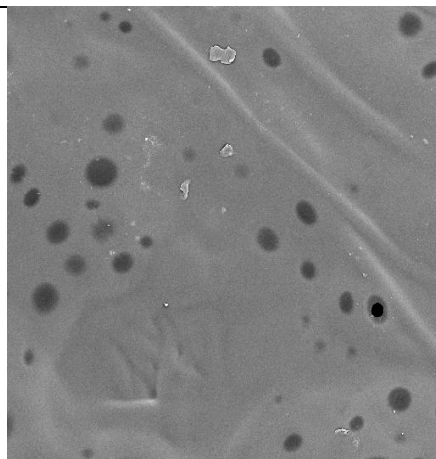
patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	19,3	16,3	14,7	7,8	5,7	2,8	4,3	2,5	2,9	6,5

Graf 22.:



Obr. 11.:
Vzorek 3B

Polymer+ 2x
nános
síťovacího
prostředku +
2x fulár

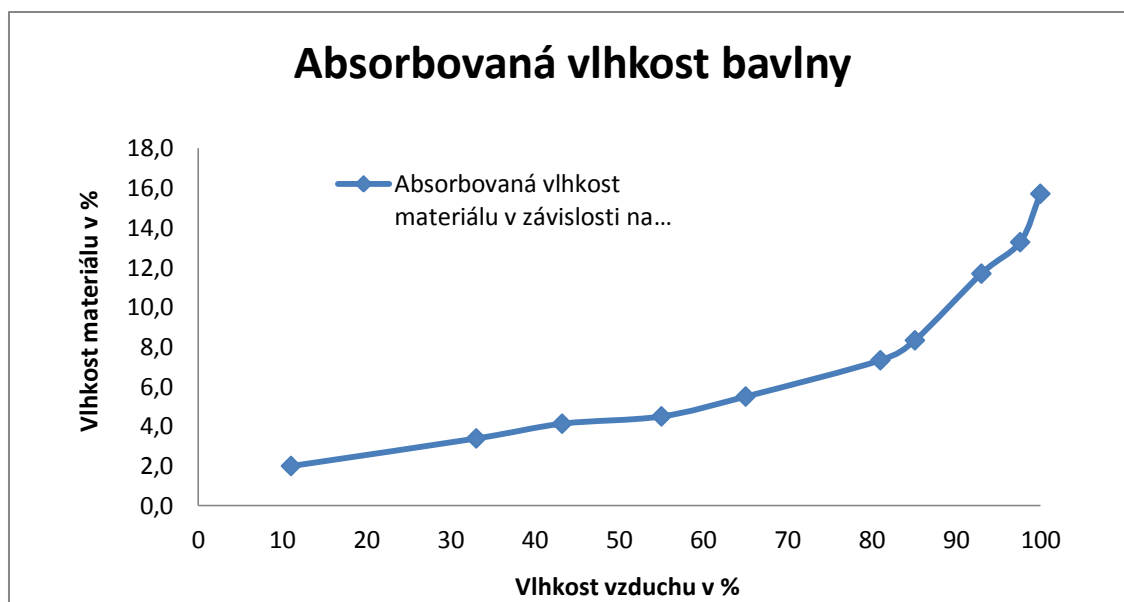


Bavlněná doprovodná tkanina

Tab. 17.:

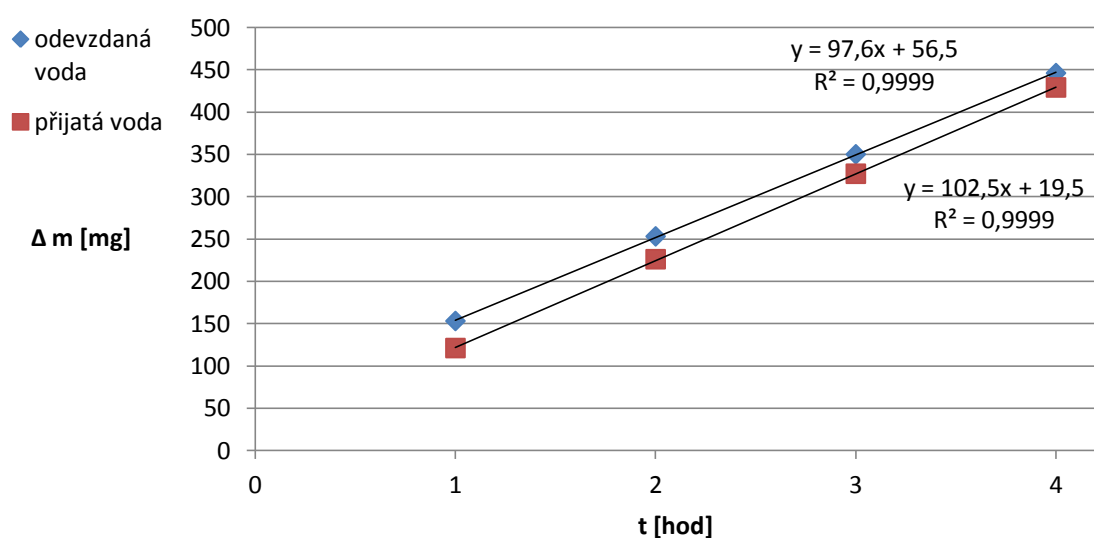
patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	15,7	13,3	11,7	8,3	7,3	5,5	4,5	4,1	3,4	2,0

Graf 23.:



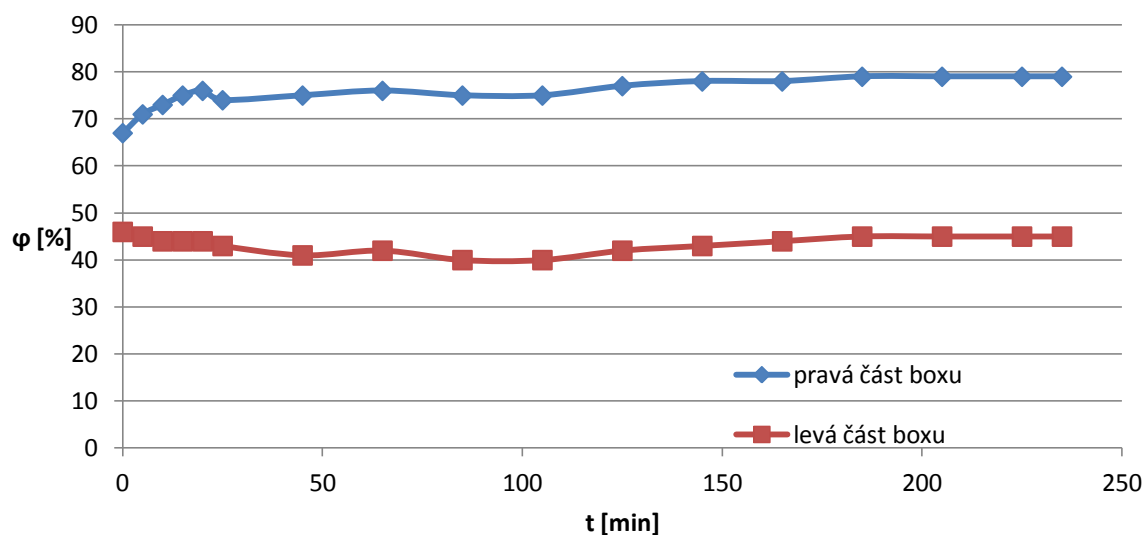
Graf 24.:

Transportovaná hmotnost vody bavlněné doprovodné tkaniny



Bavlněná doprovodná tkanina

Graf 25.: Vlhkost bavlněné tkaniny v jednotlivých boxech- prostor A a B



Tab. 18.: Číselná analýza

Analýza vlhkosti	Relativní vlhkost vzduchu 60 min	Relativní vlhkost vzduchu 240 min	Min relativní vlhkost – čas min	Min relativní vlhkost – vlhkost %
Box A	42	45	80	40
Box B	76	79	-	-

Poznámka ke grafu 25 a tabulce 18: levá část boxu = prostor A;

pravá část boxu = prostor B

Polyamidová doprovodná tkanina

Tab. 19.:

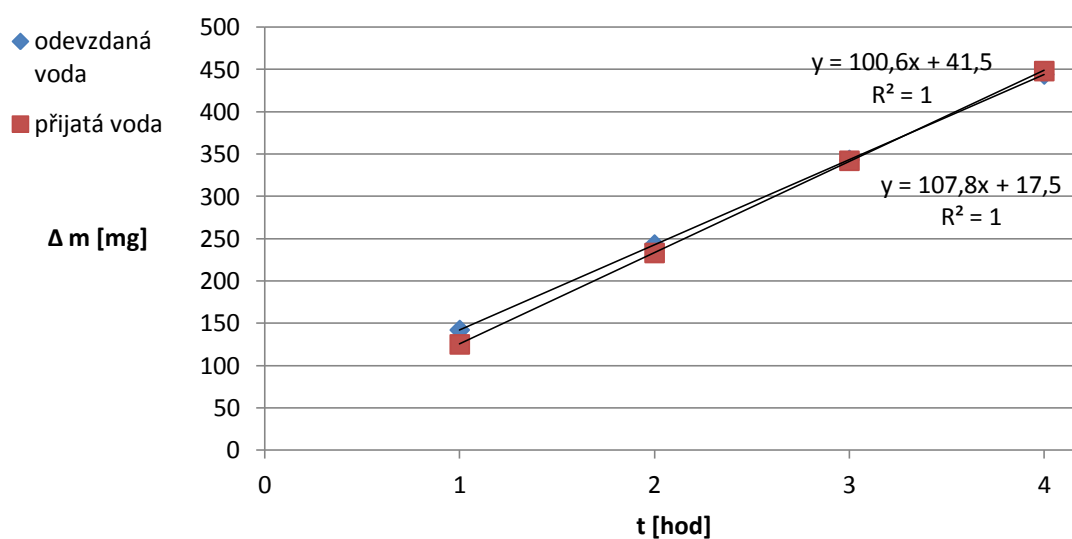
patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	15,0	13,9	5,0	3,8	3,5	2,0	1,7	1,2	1,0	1,0

Graf 26.:



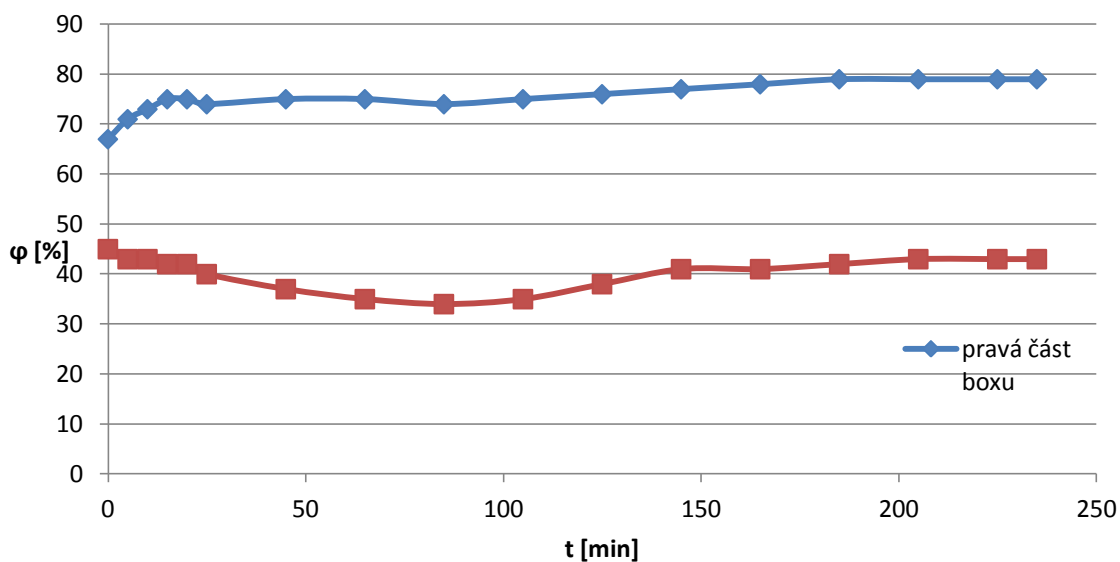
Graf 27.:

Transportovaná hmotnost vody polyamidové doprovodné tkaniny



Polyamidová doprovodná tkanina

Graf 28.: Vlhkost polyamidové tkaniny v jednotlivých boxech- prostor A a B



Tab. 20.: Číselná analýza

Analýza vlhkosti	Relativní vlhkost vzduchu 60 min	Relativní vlhkost vzduchu 240 min	Min relativní vlhkost – čas min	Min relativní vlhkost – vlhkost %
Box A	36	43	85	34
Box B	75	79	-	-

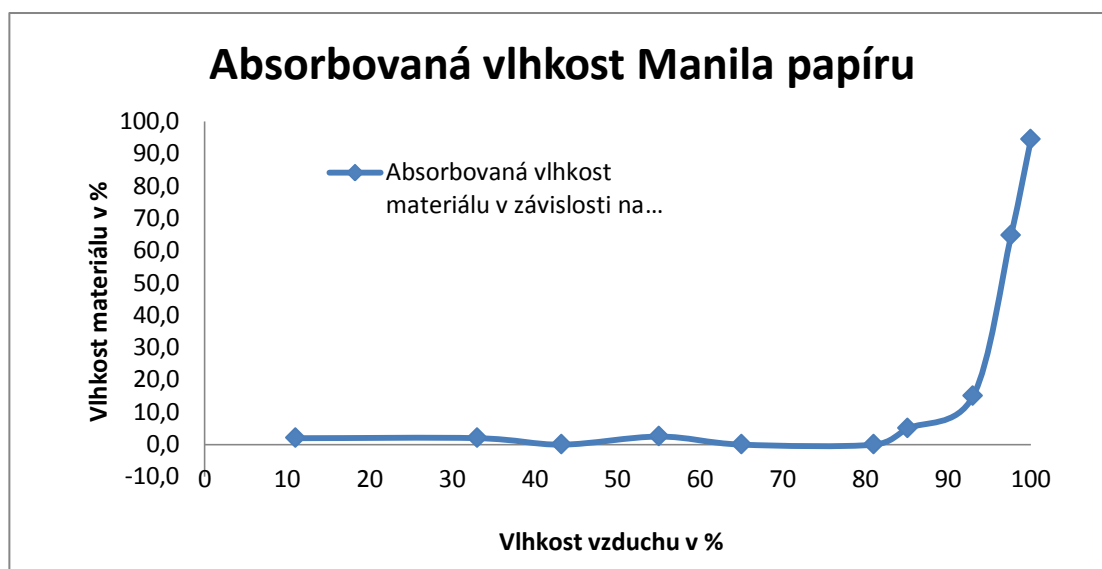
Poznámka ke grafu 28 a tabulce 20: levá část boxu = prostor A;

pravá část boxu = prostor B

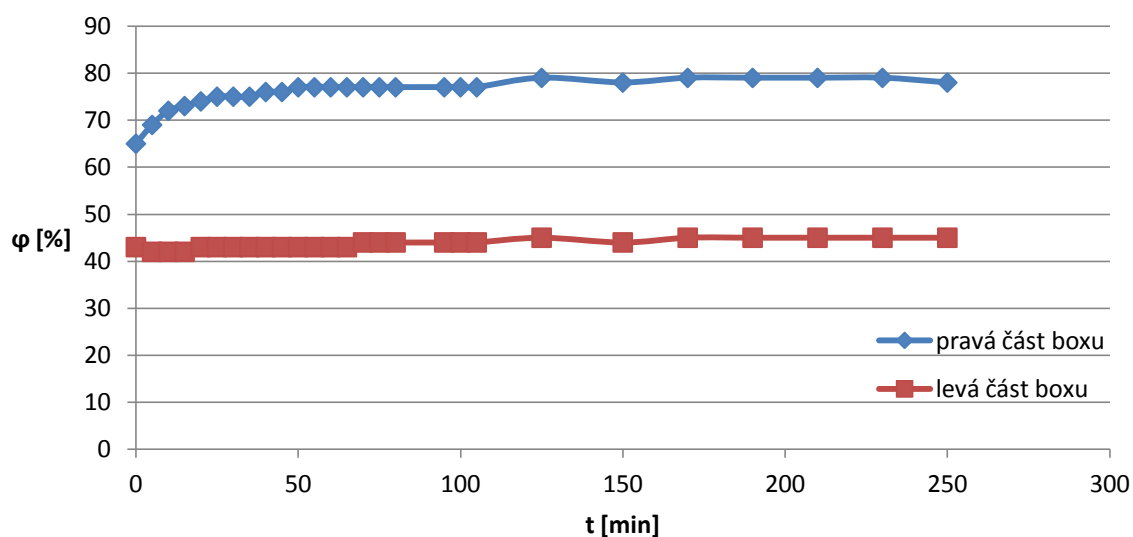
Manila papír
Tab.21.:

patrona č.	1	3	4	6	5	2	9	8	7	10
Vlhkost vzduchu v %	100	97,6	93	85,1	81	65	55	43,2	33	11
Vlhkost materiálu v %	94,4	64,7	15,0	5,0	0,0	0,0	2,5	0,0	2,0	2,0

Graf 29.:



Graf 30.: Vlhkost skleněných vláken v jednotlivých částech boxu- prostor A a B



Tab. 22.: Číselná analýza

Analýza vlhkosti	Relativní vlhkost vzduchu 60 min	Relativní vlhkost vzduchu 240 min	Min relativní vlhkost – čas min	Min relativní vlhkost – vlhkost %
Box A	43	45	70	41
Box B	78	79	-	-

Poznámka ke grafu 30 a tabulce 22: levá část boxu = prostor A;
pravá část boxu = prostor B